

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS  
GERAIS - CAMPUS BETIM  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**GABRIEL VICTOR ALVES DA SILVA**

**CARACTERIZAÇÃO DE CONVERSORES EM APLICAÇÕES  
DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO**

**Betim, MG  
Dezembro de 2019**



**GABRIEL VICTOR ALVES DA SILVA**  
**[gabrielvictor.alves@gmail.com](mailto:gabrielvictor.alves@gmail.com)**

# **CARACTERIZAÇÃO DE CONVERSORES EM APLICAÇÕES DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Betim como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Vagner Ferreira

Co-Orientador: Prof. Victor Alves Silva e Melo

**Betim, MG**  
**Dezembro de 2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586c Silva, Gabriel Victor Alves da

Caracterização de conversores em aplicações de aquecimento por indução / Gabriel Victor Alves da Silva. – 2019.

61 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Câmpus Betim, 2019.

Orientação: Reginaldo Vagner Ferreira. Coorientação: Victor Alves Silva e Melo.

1. Aquecimento - Indução. 2. Controle eletrônico. 3. Conversores. 4. Inversores. I. Silva, Gabriel Victor Alves da. II. Instituto Federal de Minas Gerais, Câmpus Betim, Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

CDU 621.38

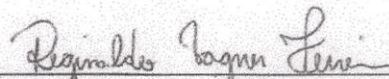
GABRIEL VICTOR ALVES DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO DE CONVERSORES EM APLICAÇÕES  
DE AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Minas Gerais Campus Betim como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

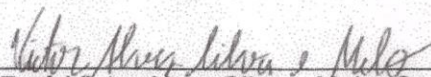
Betim, 12 de dezembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



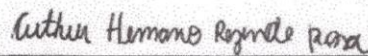
---

Prof. Reginaldo Vagner Ferreira (Orientador)  
DAUTI – IFMG Campus Betim




---

Prof. Victor Alves Silva e Melo (Coorientador)  
DAUTI – IFMG Campus Betim



---

Prof. Arthur Hermano Rezende Rosa  
DAUTI – IFMG Campus Betim



---

Prof. Armando Souza Guedes  
DAUTI – IFMG Campus Betim

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que estiveram comigo durante todo o tempo apoiando e incentivando a cada desafio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Espedito e Maria da Paz, que me acompanharam ao longo de todo o curso, auxiliando e dando forças para superar cada um dos desafios diários encontrados, certamente fazem parte desta conquista e sem vocês eu não teria conseguido. Não teria conseguido também sem o apoio, paciência e compreensão das minhas irmãs, da minha namorada e dos meus amigos que lidaram muitas vezes com a minha ausência para me dedicar aos estudos e ao trabalho.

Agradeço ao meu orientador Dr. Reginaldo Vagner Ferreira pelo apoio na realização deste trabalho, por suas orientações e principalmente pelo incentivo que sempre dá aos seus alunos para que sigam adiante mesmo com as dificuldades. Agradeço ao professor Victor Alves Silva e Melo, pela disponibilidade e auxílio ao longo do curso.

Agradeço aos amigos da faculdade pelo companheirismo e cooperação, por terem contribuído para a melhoria do curso e tornado a jornada mais leve quando necessário.

Acima de tudo, agradeço a Deus por me proporcionar uma nova possibilidade a cada dia, pois se ainda há tempo para viver, ainda há tempo para tudo.

## RESUMO

SILVA, Gabriel Victor Alves da. Caracterização de Conversores em Aplicações de Aquecimento por Indução, 2019. (Graduação em Engenharia de Controle e Automação). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Betim.

Em diversas aplicações industriais é necessário realizar o aquecimento de metais para fins variados, como para realizar tratamento térmico, têmpera, pré-aquecimento para solda, forjamento, entre outros. O aquecimento por indução apresenta vantagens em relação aos métodos convencionais e seu uso tem sido intensificado. Ele consiste na utilização do fenômeno da indução eletromagnética para aquecer metais através da potência dissipada pela corrente induzida em uma peça alvo. Este trabalho de conclusão de curso tem por objetivo explorar a utilização de conversores eletrônicos que são utilizados em aplicações de aquecimento por indução, também investigar suas características principais e abordar o seu funcionamento de modo abrangente. Para isso uma pesquisa é realizada considerando os aspectos principais dessa tecnologia e um modelo computacional de aquecedor indutivo é apresentado.

**Palavras-chave:** Aquecimento por indução; Conversores eletrônicos; Inversor; Controle.



## ABSTRACT

*In various industrial applications it is necessary to heat metals for various purposes, such as heat treatment, quenching, preheating for welding, forging, among others. Induction heating has advantages over conventional methods and its use has been intensified. It consists of using the phenomenon of electromagnetic induction to heat metals through the power dissipated by the induced current in a target part. This course completion paper aims to explore the use of electronic converters used in induction heating applications, as well as to investigate their main features and to approach their operation comprehensively. To this end, a research is carried out considering the main aspects of this technology and a computational model of inductive heater is presented.*

**Key-words:** *Induction heating; Electronic converters; Inverter; Control.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Indução eletromagnética. ....	15
Figura 2 - Conversor de potência (retificador + inversor).....	16
Figura 3 - Laço de histerese.....	22
Figura 4 - Circuito elétrico equivalente da bobina e carga do aquecedor indutivo. ....	24
Figura 5 - Retificador trifásico não controlado. ....	26
Figura 6 - Inversor monofásico em meia ponte e ponto médio com capacitor. ....	28
Figura 7 - Inversor monofásico em ponte com tiristores.....	29
Figura 8 - Inversor monofásico em ponte com carga acoplada por transformador. ....	29
Figura 9 - Circuito <i>Snubber</i> . ....	30
Figura 10 - Parâmetros ótimos do circuito <i>snubber</i> para projeto com compromisso.....	31
Figura 11 - Forno de indução a canal. ....	34
Figura 12 - Forno de indução a cadinho. ....	34
Figura 13 - Aquecedores indutivos sem núcleo.....	35
Figura 14 - Retificador com transformador hexafásico.....	36
Figura 15 - Forma de onda de um retificador com transformador hexafásico. ....	37
Figura 16 - Cabo elétrico refrigerado a água.....	39
Figura 17 - Painel elétrico de conversor de potência.....	40
Figura 18 - Inversor alimentado em tensão (a), Inversor alimentado em corrente (b). ....	41
Figura 19 - Conversores utilizados em tratamento térmico por indução.....	42
Figura 20 - Tipos de formatos de bobinas de indução.....	42
Figura 21 - Malhas de controle possíveis para aquecimento por indução.....	44
Figura 22 - Variação do tempo morto. ....	46
Figura 23 - Sistema de aquecimento por indução.....	48
Figura 24 - Peça de alumínio para tratamento de recozimento pleno. ....	49
Figura 25 - Modelo equivalente elétrico do forno de indução. ....	53
Figura 26 - Circuito de controle e acionamento. ....	55
Figura 27 - Corrente eficaz na bobina do aquecedor.....	56
Figura 28 - Sequência de chaveamento do inversor. ....	57
Figura 29 - Tensão na saída do inversor e corrente eficaz na bobina do aquecedor. ....	58

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Temperatura de Curie para alguns materiais magnéticos.....	23
Tabela 2 - Condições vantajosas para utilização de fornos de indução em fusão de metais....	33
Tabela 3 - Projeto mecânico do forno de indução para aquecimento de alumínio.....	49
Tabela 4 - Profundidade de penetração para o alumínio. ....	51

## ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES

LC	Associação de indutor e capacitor
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
ZVS	<i>Zero Voltage Switching</i>
ZCS	<i>Zero Current Switching</i>
SCR	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
CC	Corrente contínua
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
CA	Corrente alternada
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
PID	Proporcional Integral Derivativo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$	Força eletromotriz induzida
V	Volt
$d\phi$	Variação do fluxo magnético
Wb	Weber
dt	Variação de tempo
s	Segundos
N	Número de voltas de uma bobina
Q	Calor
J	Joule
I	Corrente elétrica
A	Ampere
R	Resistência elétrica
$\Omega$	Ohm
T	Tempo
$\delta$	Profundidade de penetração da corrente elétrica
m	Metro
e	Número neperiano
$\rho$	Resistividade elétrica
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa
H	Henry
f	Frequência elétrica
Hz	Hertz
B	Campo magnético
H	Campo elétrico
Lm	Indutância mútua
C	Capacitor
L	Indutor
$\phi$	Fluxo magnético
$f_R$	Frequência de ressonância
$\pi$	Pi
F	Faraday

D	Diodo
G	Gatilho
Cressonante	Capacitor do circuito ressonante
Rbobina	Resistência elétrica da bobina do aquecedor
Lbobina	Indutância da bobina do aquecedor
Cs	Capacitor do circuito <i>snubber</i>
Rs	Resistor do circuito <i>snubber</i>
Lc	Indutância de um circuito elétrico
$I_R$	Corrente de pico de recuperação reversa
$V_p$	Tensão de pico
$V_s$	Tensão de entrada
$d_0$	Fator ótimo da corrente elétrica
$\delta_a$	Fator de amortecimento
Y	Ligação em configuração estrela
$\Delta$	Ligação em configuração triângulo
$V_o$	Tensão de saída
$I_o$	Corrente de saída
W	Watt
$\Phi_o$	Ângulo de fase de saída
$f_o$	Frequência de saída
$T_o$	Temperatura de saída
g	Gramas
mm	Milímetro
d	Densidade
$V_m$	Volume da peça de trabalho
$D_m$	Diâmetro da peça de trabalho
$H_m$	Altura da peça de trabalho
$D_{in}$	Diâmetro interno da bobina
$H_{in}$	Altura da bobina
$\Delta T$	Variação de temperatura
P	Potência elétrica
$I_{peça}$	Corrente elétrica induzida na peça de trabalho
$R_{eq}$	Resistência elétrica equivalente

Ieq	Indutância equivalente
Cres	Capacitor do circuito ressonante
Rpeça	Resistência elétrica da peça de trabalho
Bp	Densidade de fluxo magnético máxima
E	Tensão induzida eficaz
T	Tesla
N	Número de espiras da bobina do aquecedor
Ibob	Corrente elétrica eficaz na bobina do aquecedor
Kp	Ganho proporcional
Ki	Ganho integral

## SUMÁRIO

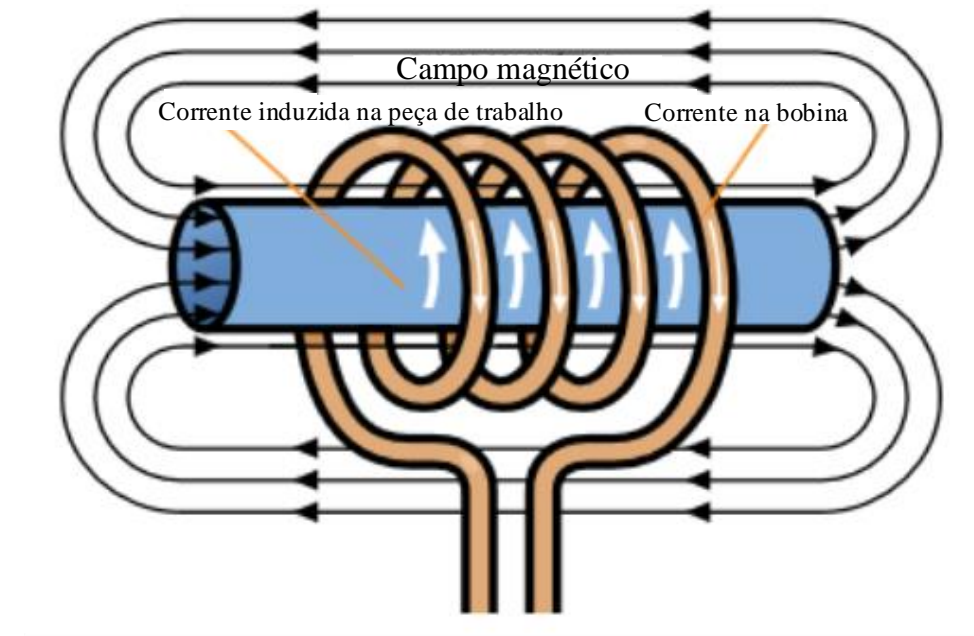
1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	RELEVÂNCIA .....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	OBJETIVOS.....	18
1.3.1	Objetivo Geral .....	18
1.3.2	Objetivos Específicos .....	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	20
2.1	PRINCÍPIOS DO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO.....	20
2.1.1	Lei de Faraday-Lenz.....	20
2.1.2	Efeito Joule.....	21
2.1.3	Efeito pelicular .....	21
2.1.4	Histerese magnética.....	22
2.1.5	Indutância mútua .....	23
2.1.6	Influência no aquecimento indutivo .....	24
2.2	CIRCUITOS ELÉTRICOS APLICADOS EM AQUECEDORES INDUTIVOS.....	25
2.2.1	Circuito ressonante LC.....	25
2.2.2	Retificador trifásico .....	26
2.2.3	Inversor monofásico .....	27
2.2.3.1	Inversor monofásico em meia ponte e ponto médio com capacitor .....	27
2.2.3.2	Inversor monofásico em ponte .....	28
2.2.4	Circuito <i>Snubber</i> RC .....	30
3	METODOLOGIA .....	32
4	CARACTERÍSTICAS DE AQUECEDORES INDUTIVOS INDUSTRIAIS .....	33
4.1	TIPOS DE AQUECEDORES .....	33
4.1.1	Aquecedores para a fusão.....	33



4.1.2	Aquecedores para tratamento térmico e aquecimento superficial.....	35
4.2	ELEMENTOS DE UM AQUECEDOR INDUTIVO INDUSTRIAL .....	35
4.2.1	Fonte de alimentação.....	36
4.2.2	Proteção .....	37
4.2.3	Unidade de refrigeração .....	38
4.2.4	Conversor de potência .....	39
4.2.5	Bobina do aquecedor .....	42
5	TÉCNICAS DE CONTROLE EM AQUECIMENTO POR INDUÇÃO .....	43
5.1	TÉCNICAS APLICADAS AO ESTÁGIO RETIFICADOR.....	45
5.2	TÉCNICAS APLICADAS AO ESTÁGIO INVERSOR .....	45
6	MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM AQUECEDOR INDUTIVO .....	48
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	59
	REFERÊNCIAS .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

O aquecimento por indução consiste na utilização do fenômeno físico causado pela circulação de uma corrente elétrica em um condutor metálico. Quando um material metálico está inserido em um campo magnético variável, circula por ele correntes parasitas, as quais geram calor por efeito Joule [1]. Assim como pode ser visto na Figura 1, em um aquecedor indutivo, uma corrente alternada é aplicada a uma bobina primária e um campo magnético alternado é criado. Este campo é responsável por induzir a corrente no metal que se deseja aquecer, o qual pode ser interpretado eletricamente como uma bobina secundária de um transformador [2], [3].



**Figura 1 - Indução eletromagnética.**  
Fonte: Adaptado de [2].

A utilização do aquecimento por indução data desde experimentos realizados por Michael Faraday, o qual observou o princípio da indução eletromagnética. Porém o seu primeiro uso prático data de 1900, em um forno de indução desenvolvido por Kjellin, na Suécia [4]. O avanço da eletrônica de potência e o amplo desenvolvimento de conversores estáticos possibilitaram modificar as fontes de alimentação dos circuitos elétricos e assim ampliar o uso dos aquecedores indutivos.

Em relação à alimentação elétrica dos aquecedores indutivos, esta pode ser de diversos tipos e formas. É comum a utilização de aquecedores alimentados em média e alta frequência,

isto para que seja aproveitado o chamado efeito pelicular. Quando uma corrente alternada flui em um condutor, ela se distribui de forma não uniforme, e esta distribuição depende da frequência, do campo elétrico, da condutividade elétrica, das dimensões e da forma geométrica do condutor [5].

Em geral, a circulação de uma corrente elétrica em alta frequência faz com que a corrente concentre-se nas extremidades do condutor, assim, em um aquecedor indutivo, alimentar o circuito em altas frequências significa concentrar a corrente, e conseqüentemente o aquecimento, na superfície da peça. Este efeito é interessante para diversas aplicações onde se deseja aquecer rapidamente um material a partir da superfície. Para aquecer um material por inteiro, é necessário aumentar o tempo em que se opera o aquecedor, para que toda a peça se aqueça por condução a partir do aquecimento da superfície [6], [7].

Para obter fontes de alimentação em média e alta frequência, são utilizados conversores estáticos de potência, conhecidos também como inversores de frequência, que condicionam a energia para alimentar a bobina do aquecedor [4], [8]. Circuitos conversores são compostos basicamente de três partes: Retificador, filtro LC e inversor. Existem várias formas de realizar a implementação destes circuitos [6], [9]. A Figura 2 apresenta uma configuração possível para este tipo de aplicação, construída com um retificador trifásico não controlado e um inversor monofásico com chaves IGBT.

A energia que é fornecida para o aquecedor indutivo pode ser controlada através do acionamento das chaves de potência, o qual pode ser realizado de diversas formas, relacionadas às técnicas de chaveamento e controle dos conversores, que serão abordadas nesse texto.

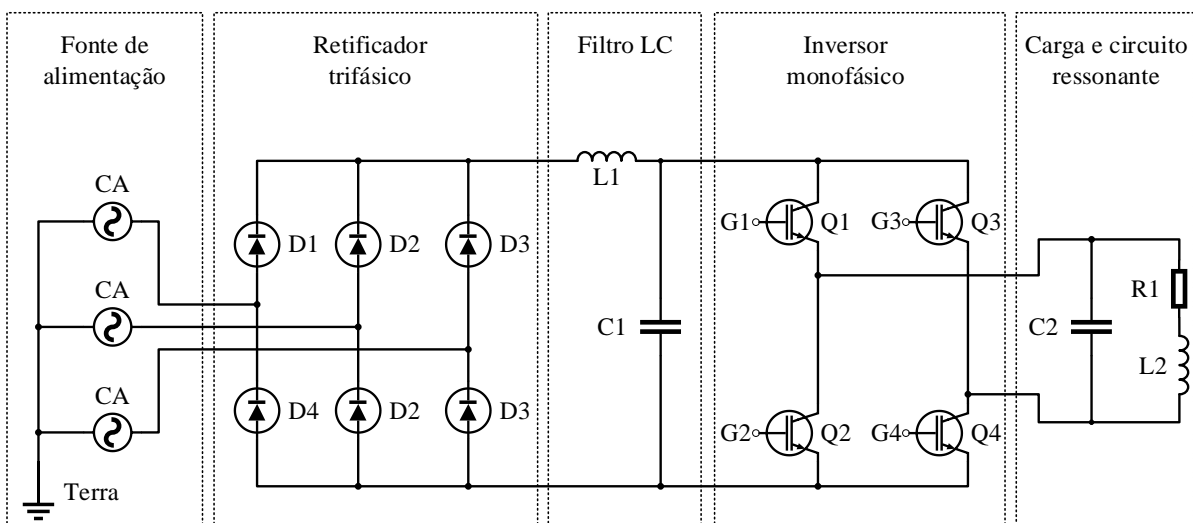


Figura 2 - Conversor de potência (retificador + inversor).

## 1.1 RELEVÂNCIA

Em diversas aplicações industriais, é necessário realizar o aquecimento de metais para fins variados, como para realizar tratamento térmico, têmpera, pré-aquecimento para solda, forjamento, brasagem, entre outros. Existem vários métodos e tipos de aquecedores indutivos utilizados em aquecimento de metais. Os métodos convencionais, que utilizam combustão, são muitas vezes dispendiosos e ineficientes, além de produzirem poluentes devido ao uso de combustíveis não renováveis [8]. Assim, a tecnologia do aquecimento por indução eletromagnética tem se mostrado viável devido às diversas vantagens que apresenta em relação aos métodos convencionais, dentre elas: Capacidade de geração profunda de calor rapidamente em regiões definidas na peça de trabalho, levando a um baixo tempo de ciclo de processo (alta produtividade) com qualidade repetível; intensidade de calor altamente controlável podendo variar de pequenas taxas (por exemplo, de  $2^{\circ}\text{C}$ - $3^{\circ}\text{C}/\text{s}$  para aplicações de têmpera e alívio de tensão) a altas intensidades de calor (por exemplo, excedendo  $800^{\circ}\text{C}/\text{s}$  no endurecimento de engrenagens); maior eficiência em termos energéticos e inerentemente mais ecológico do que a maioria das outras fontes de calor, incluindo fornos a gás, banhos de sal e chumbo, sistemas de carburação ou nitretação; maior segurança, já que não é utilizada a combustão e nem os contaminantes ambientais; melhor qualidade de superfície dos materiais metálicos aquecidos, com uma redução significativa da escala e descaburação; menor tempo de inicialização e desligamento, eliminando ou reduzindo drasticamente os períodos ociosos de aquecimento improdutivo e menor espaço físico necessário para uma mesma taxa de produção [6].

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de conversores para o controle de Fornos de Indução aumenta a eficiência do sistema [9], aumentar a frequência da corrente alternada que flui através das bobinas de indução aumenta a quantidade de energia que pode ser aplicada a um forno de determinado tamanho, por sua vez, isso significa uma fusão mais rápida [4]. Os conversores ajustam o sinal de alimentação para o indutor do forno de modo a atingir o melhor aproveitamento do efeito da indução para o aquecimento do metal [8].

O fato dos fornos de indução não utilizarem gases combustíveis ou elementos explosivos, reduz o risco das instalações. A segurança neste caso é feita através do controle

dos circuitos elétricos de alimentação do forno, controle de fluxo de corrente através do conversor e também com a utilização de circuitos de refrigeração para as bobinas do forno [10]. A bobina do forno de indução não necessita aquecer para induzir corrente no metal alvo, isto permite adotar medidas para que somente a peça a ser aquecida esteja em alta temperatura.

O aquecimento por indução pode ser utilizado de forma bem mais específica e direcionada em comparação aos métodos convencionais. Isto permite a redução do consumo de energia, já que não é necessária uma grande instalação para se aquecer um ponto em específico. Por todos esses motivos se faz necessário o estudo deste tipo de equipamento, haja vista a sua crescente relevância no ambiente industrial.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral deste trabalho é explorar a utilização de conversores eletrônicos que são utilizados em aplicações de aquecimento por indução, também investigar suas características principais e abordar o seu funcionamento de modo abrangente.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Através do estudo das características dos conversores aplicados em aquecimento por indução, espera-se conseguir distinguir o motivo da utilização de cada técnica de controle, bem como o seu funcionamento de modo geral. Pretende-se reunir e demonstrar os principais aspectos das tecnologias aplicadas em aquecimento por indução e exemplificar a sua aplicação por meio de modelagem computacional.

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está dividido em sete capítulos, primeiramente são apresentados os assuntos que serão abordados ao longo do trabalho, através de uma introdução ao tema e

contextualização do trabalho, no primeiro capítulo. Ainda com o intuito de iniciar a discussão de conceitos relevantes, o segundo capítulo fornece a fundamentação teórica necessária para boa compreensão dos assuntos que serão tratados no desenvolvimento do trabalho. O terceiro capítulo apresenta a metodologia da pesquisa utilizada para a fundamentação e elaboração desse trabalho.

No quarto capítulo é aprofundada a pesquisa em relação às tecnologias utilizadas em aquecedores indutivos industriais, apresentando os aspectos relevantes de todos os itens que compõe uma máquina industrial construída para este fim. O quinto capítulo apresenta e investiga as técnicas de controle utilizadas nesse tipo de equipamento.

O sexto capítulo tem o objetivo de demonstrar uma das tecnologias aplicadas em aquecedores indutivos através de um projeto de aquecedor, um modelo computacional e a análise do mesmo. Por fim, o sétimo capítulo é destinado à apresentação dos resultados e discussões relevantes ao tema abordado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os processos de aquecimento por indução envolvem diversas disciplinas de diferentes áreas do conhecimento. A seguir são apresentados conceitos importantes para o bom entendimento do funcionamento de máquinas de aquecimento por indução. Pretende-se assim apresentar as características elétricas da máquina no aquecimento da peça de trabalho, e os circuitos elétricos utilizados para gerar esses efeitos.

### 2.1 PRINCÍPIOS DO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

#### 2.1.1 Lei de Faraday-Lenz

Quando um condutor está inserido em um campo magnético variante, circula por ele uma corrente elétrica induzida proporcional a este campo. A equação de Maxwell conhecida como Lei de Faraday-Lenz relaciona a força eletromotriz induzida com a variação do fluxo magnético no tempo [11]. Quanto maior for a variação do fluxo de campo magnético agindo no material condutor em determinado espaço de tempo, maior será a força eletromotriz produzida e conseqüentemente também a corrente elétrica induzida, ambos em sentido oposto à variação do fluxo [11], [12].

$$\varepsilon = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1. a)$$

Onde:

$\varepsilon$ : Força eletromotriz induzida [V]

$d\varphi$ : Variação do fluxo magnético [Wb]

$dt$ : Intervalo de tempo [s]

Para o caso de uma bobina feita com fios enrolados, onde o fluxo magnético é igual para todas as suas “N” voltas, torna-se verdadeira a forma abaixo para a expressão 2.1.a [11]:

$$\varepsilon = -N * \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1. b)$$

### 2.1.2 Efeito Joule

Quando circula uma corrente elétrica por um condutor, uma determinada potência é dissipada através da resistência elétrica desse condutor, o que conseqüentemente gera aquecimento no mesmo, transformando energia elétrica em energia térmica. Esse efeito pode ser interpretado fisicamente como o choque dos elétrons circulantes com as partículas do condutor, e a Lei de Joule relaciona a potência dissipada no condutor com sua resistência elétrica e a corrente que o percorre durante determinado tempo [3], [13].

$$Q = I^2 * R * t \quad (2.1. c)$$

Onde:

$Q$ : Calor gerado [J]

$I$ : Corrente elétrica eficaz [A]

$R$ : Resistência elétrica do condutor [ $\Omega$ ]

$t$ : Intervalo de tempo em que a corrente percorre o condutor [s]

### 2.1.3 Efeito pelicular

Quando uma corrente elétrica constante flui em um condutor homogêneo, de seção transversal não negligenciável, ela se distribui uniformemente nesta seção. O mesmo não se pode dizer quando a corrente é alternada, esta não se distribui uniformemente e a distribuição depende da frequência, do campo elétrico, da condutividade elétrica, das dimensões e da forma geométrica do condutor. No caso de um condutor de seção transversal circular a densidade de corrente varia ao longo do raio, sendo máxima na superfície e mínima em seu eixo [5].

Assim, quanto maior for a frequência da corrente elétrica mais ela tende a se concentrar na borda de um condutor circular, e menor será a sua profundidade de penetração. A profundidade de penetração da corrente ( $\delta$ ) é definida como a distância para a qual o módulo da distribuição da corrente elétrica cai a  $1/e$  (aproximadamente 37%) em relação ao valor da corrente elétrica na superfície do condutor [14]. A expressão 2.1.d relaciona a frequência da corrente elétrica e a permeabilidade magnética do condutor com a profundidade de penetração da corrente [3], [6], [8], [12], [14].



$$\delta = 503 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} \quad (2.1. d)$$

Onde:

$\delta$ : Profundidade de penetração da corrente elétrica [m]

$\rho$ : Resistividade elétrica do material [ $\Omega \cdot m$ ]

$f$ : Frequência da corrente elétrica [Hz]

$\mu_r$ : Permeabilidade magnética relativa do material [H/m]

#### 2.1.4 Histerese magnética

Materiais com características ferromagnéticas, como os compostos de ferro ou ligas de ferro com cobalto, níquel e outros metais, possuem um grande número de domínios com momentos magnéticos orientados aleatoriamente, o que faz com que o fluxo magnético líquido resultante seja zero. Na presença de uma força magnetizante, os domínios desse tipo de material tendem a se alinhar com o campo magnético aplicado, porém quando o campo cessa uma componente de magnetização líquida é retida na direção do mesmo, fenômeno conhecido como histerese magnética [11].

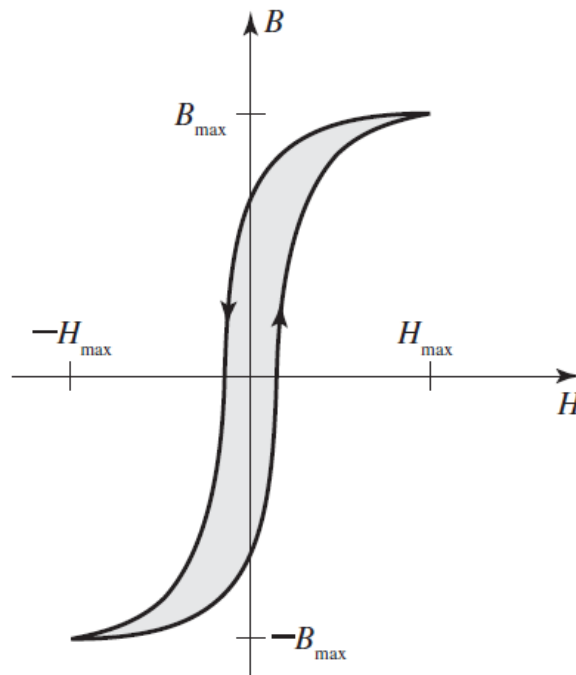


Figura 3 - Laço de histerese.  
Fonte: [11].

A Figura 3 apresenta um exemplo de laço de histerese. A cada ciclo do laço, é dissipada energia em forma de calor para reorientar os dipolos do material, de modo que as perdas por histerese são proporcionais à área delimitada pelo laço [11]. Assim, materiais ferromagnéticos aquecem mais, tornando o processo mais eficiente devido às perdas magnéticas por histerese, enquanto materiais paramagnéticos, como o alumínio, por exemplo, não sofrem o mesmo efeito e o aquecimento é reduzido [15].

O efeito da histerese magnética se aplica para materiais magnéticos ou ferromagnéticos abaixo da temperatura de Curie, ponto em que o material perde as suas características magnéticas. Após ultrapassar a temperatura de Curie, a dinâmica da carga muda significativamente [7], [16], [17]. A Tabela 1 mostra a temperatura de Curie para alguns materiais ferromagnéticos.

**Tabela 1 - Temperatura de Curie para alguns materiais magnéticos.**  
Fonte: Adaptado de [6].

Material magnético	Aço carbono SAE 1008	Aço carbono SAE 1060	Permalloy	Cobalto	Níquel
Temperatura [°C]	768	732	440	1120	358

### 2.1.5 Indutância mútua

A indutância mútua é o efeito da indutância de um condutor em outro condutor quando este está presente no seu campo magnético. A carga de trabalho, ou peça de trabalho, que vai ser aquecida também faz parte do circuito elétrico da máquina, exercendo influência pela indutância mútua entre ela e a bobina do aquecedor [3], [6]. Assim, pode-se interpretar um aquecedor indutivo como um transformador, em que no secundário existe apenas uma bobina em curto circuito. O circuito equivalente elétrico da carga pode ser visto na Figura 4, onde o lado primário do transformador representa a bobina do aquecedor, sendo que  $R_1$  é a resistência elétrica do cobre e  $L_1$  é a indutância da bobina, o secundário representa o material a ser aquecido, onde  $R_2$  é a resistência elétrica da peça e  $L_2$  é a sua indutância própria,  $L_m$  representa a indutância mútua entre a peça de trabalho e a bobina do aquecedor [12], [18].

Quando uma corrente alternada circula pela bobina  $L_1$  do aquecedor, produz o fluxo magnético  $\varphi_1$ , que tem sua interação com a peça de trabalho representada por  $\varphi_{12}$ . A corrente

induzida na peça, por sua vez, produz o fluxo  $\varphi_2$ , cuja interação com a bobina do aquecedor está representada por  $\varphi_{21}$ . O fluxo concatenado na bobina L1 devido à corrente  $i_2$  e o fluxo concatenado na bobina L2 devido à corrente  $i_1$  estão relacionados através da indutância mútua entre L1 e L2 [19], [20].

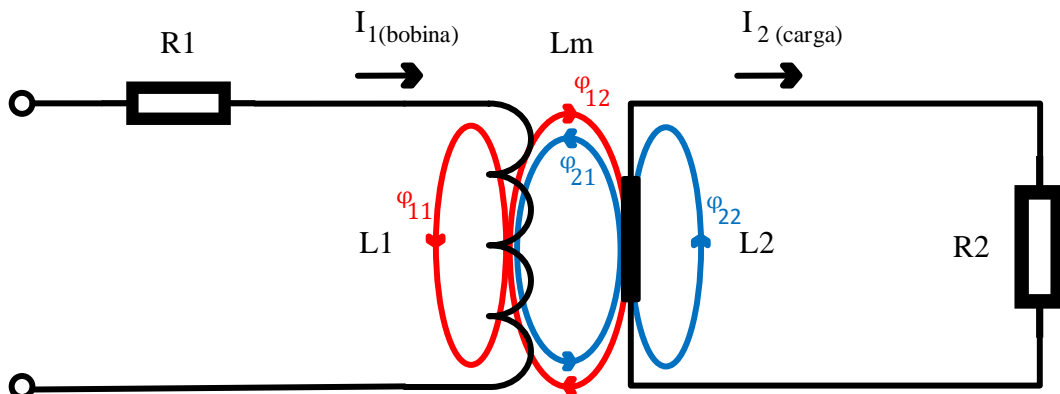


Figura 4 - Circuito elétrico equivalente da bobina e carga do aquecedor indutivo.

### 2.1.6 Influência no aquecimento indutivo

Todos os conceitos citados têm influência direta no aquecimento da peça de trabalho, sendo importante a sua compreensão para o projeto de um aquecedor. O efeito Joule é utilizado para promover o aquecimento, pela expressão 2.1.c é possível perceber que um aumento da corrente elétrica que circula na peça de trabalho causará uma maior transferência de calor. É possível aumentar essa corrente intensificando o campo magnético, intensificando a sua taxa de variação no tempo, como pode ser visto pela expressão 2.1.b, ou ainda aumentando o número de espiras de um indutor, pela mesma expressão [8], [12].

Um aumento da resistência da peça de trabalho, mantendo-se uma mesma corrente induzida, também causará um maior aquecimento, efeito que pode ser gerado aumentando-se a frequência elétrica, por exemplo: Correntes com frequências maiores passam em seções menores das peças de trabalho, enfrentando aí uma maior resistência [10].

O material da peça de trabalho interfere no aquecimento devido ao seu comportamento em relação à histerese magnética e também em devido à influência do mesmo na indutância mútua entre bobina e peça. A forma e posição da peça de trabalho podem modificar o acoplamento magnético entre a bobina do forno e a peça, alterando também a indutância mútua entre elas [21].

## 2.2 CIRCUITOS ELÉTRICOS APLICADOS EM AQUECEDORES INDUTIVOS

Para compreender o funcionamento das máquinas de aquecimento indutivo é necessário ter conhecimento de alguns circuitos elétricos que estão presentes nessas máquinas.

### 2.2.1 Circuito ressonante LC

O circuito ressonante LC é composto de uma configuração de indutor e capacitor, que pode ser série ou paralela. Nos fornos, o indutor é a própria bobina do forno. Essa configuração LC gera um circuito ressonante, que possui uma frequência de ressonância natural, a qual pode ser determinada através dos valores do indutor e do capacitor [5], [7].

A ressonância ocorre enquanto o indutor e o capacitor trocam a energia. A quantidade total de energia armazenada no circuito durante a ressonância permanece inalterada. Esse valor total é igual à quantidade de energia armazenada no pico, no indutor ou no capacitor. Como alguma energia é perdida devido à resistência no processo de ressonância, a quantidade total de energia compartilhada em cada ciclo ressonante varia. A frequência de ressonância, que mede a velocidade da transferência de energia, é determinada por 'C' e 'L' [1]. A equação (2.2. a) relaciona a frequência de ressonância com os valores de indutância e capacitância.

$$f_R = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \quad (2.2. a)$$

Onde:

$f_R$ : Frequência de ressonância [Hz]

$L$ : Indutância [H]

$C$ : Capacitância [F]

Veremos adiante que alguns aquecedores indutivos trabalham na frequência de ressonância, utilizando-se da característica do circuito ressoante para realizar comutação suave nas chaves eletrônicas, ou seja, o chaveamento ocorre no momento em que a tensão ou a corrente passa por zero, esse recurso é chamado ZVS (*Zero Voltage Switching*) ou ZCS (*Zero Current Switching*) [7], [17], [22], [23].

### 2.2.2 Retificador trifásico

O primeiro estágio de interesse de uma máquina de aquecimento indutivo é um circuito retificador, que tem a função de converter um sinal alternado em um sinal contínuo. Quando se alimenta um aquecedor indutivo com tensão alternada é necessário um retificador para converter em tensão contínua e entregar essa tensão na entrada de um inversor. Outro modo é alimentar a máquina diretamente com tensão contínua, dispensando o estágio retificador [6], [24].

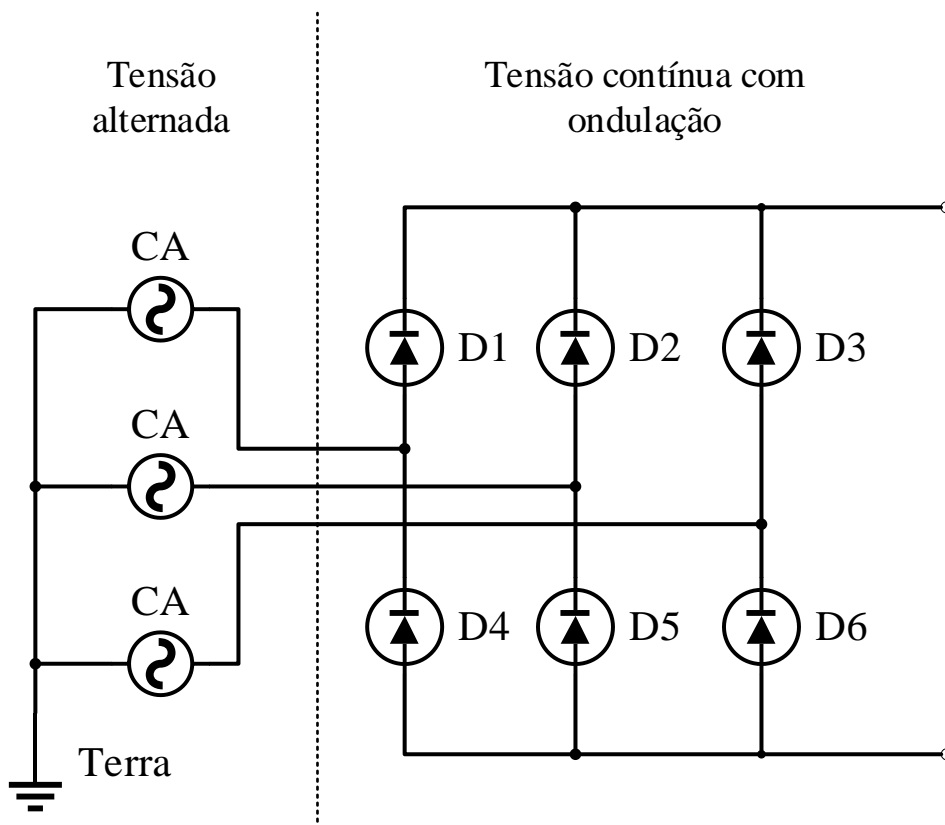


Figura 5 - Retificador trifásico não controlado.

O circuito retificador é mostrado na Figura 5, podendo ser um retificador controlado ou não controlado, basta alterar o semicondutor para um que seja chaveado. Um retificador não controlado é construído com diodos, e estes chaveiam automaticamente quando a tensão entre anodo e catodo se torna positiva. Um retificador controlado precisa ser construído com semicondutores controlados, como o SCR. Em retificadores controlados é ajustado o ângulo

de disparo das chaves semicondutoras para controlar o nível da tensão retificada em sua saída [25].

### **2.2.3 Inversor monofásico**

O segundo estágio de interesse é o circuito inversor de frequência, que tem por função converter um sinal contínuo em alternado e com uma frequência desejada. O sinal alternado na saída é gerado através do chaveamento dos semicondutores do inversor, fornecendo em sua saída uma onda quadrada, porém desta vez alternada [6], [22]. A modificação da forma de chaveamento dos semicondutores também pode variar a amplitude desta forma de onda de saída [18], [26], [27].

O circuito inversor pode ser construído de diversas formas. No caso da aplicação em aquecedores indutivos, estes inversores sintetizam uma tensão monofásica na saída, tratam-se então de inversores monofásicos. A bobina de um aquecedor indutivo já representa uma indutância, então para fazer um circuito ressonante basta acrescentar um capacitor em série ou em paralelo, dependendo da aplicação [28], [29]. A ressonância permitirá a comutação suave dos semicondutores, eliminando perdas por chaveamento, que seriam relevantes por se tratar de equipamentos que operam em média e alta frequência [26], [30], [31].

#### **2.2.3.1 Inversor monofásico em meia ponte e ponto médio com capacitor**

O Inversor monofásico em meia ponte pode ser visto na Figura 6, é amplamente utilizado em aplicações de aquecimento por indução e geralmente escolhido para sistemas domésticos de até 5 KW [22], [30]. Os dois capacitores em um “braço” da ponte proporcionam um ponto médio o qual é utilizado para realizar a inversão da corrente na carga. O uso dos capacitores é interessante por se tratar de aplicações que operam em alta frequência, permitindo que esse tipo de componente seja menor [30], [31]. Os capacitores representados na Figura 6 também fazem parte de um circuito ressonante com a carga que possui característica indutiva, o que permite que neste tipo de configuração sejam utilizados semicondutores do tipo tiristores, valendo-se da comutação por carga para abrir os mesmos [31], [30].

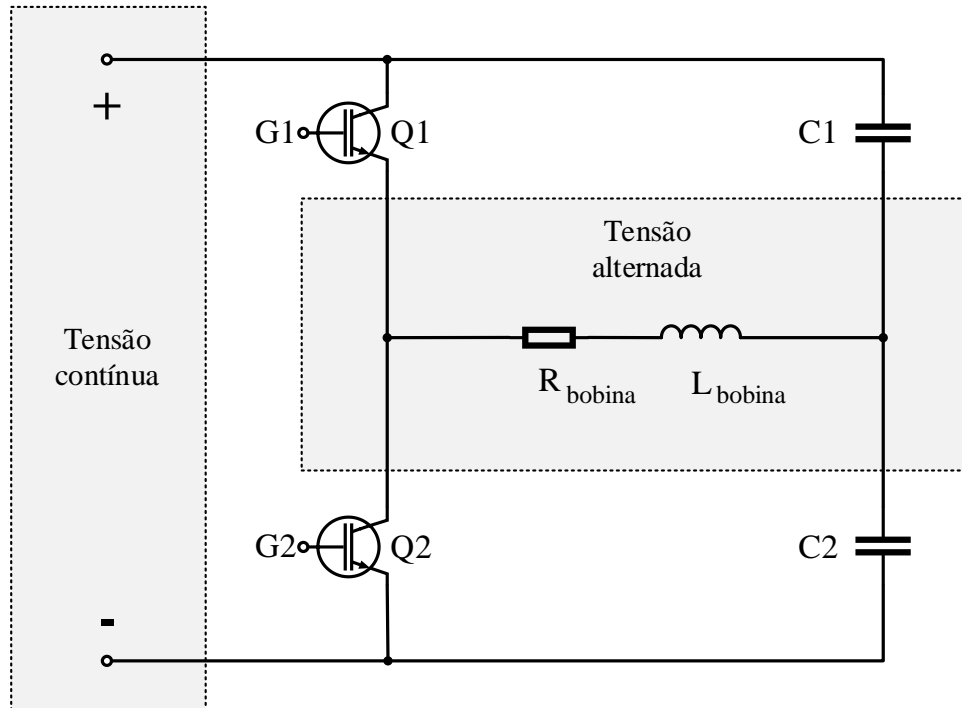


Figura 6 - Inversor monofásico em meia ponte e ponto médio com capacitor.

### 2.2.3.2 Inversor monofásico em ponte

Este inversor é construído com quatro semicondutores, configurados em ponte, onde a carga está contida na parte central da ponte, como pode ser visto na Figura 7 [31]. Nessa configuração, caso o semicondutor utilizado seja um tiristor, como o SCR, é necessária operação com chaveamento abaixo da frequência de ressonância e a utilização de um capacitor em série ou em paralelo com a carga, que é indutiva, para formar um circuito ressonante que permitirá a comutação por carga do SCR, já que este não é controlável no desligamento [9], [31], [32]. A tensão chaveada entregue na saída da ponte tem forma de onda quadrada, porém devido à característica indutiva da carga, a forma de onda de corrente possui um comportamento senoidal. Os diodos em antiparalelo com as chaves fornecem um caminho para circulação da corrente do circuito ressonante [6], [17].

A Figura 8 apresenta outra configuração possível, no caso do inversor construído com quatro semicondutores do tipo IGBT, diferentemente do SCR, é possível controlar através de chaveamento o momento em que cada IGBT irá parar de conduzir [31], sendo assim, não é estritamente necessária a utilização do capacitor para formar o circuito ressonante [33], mas a presença deste pode possibilitar o chaveamento suave e reduzir as perdas no chaveamento [7], [25], [27], [29].

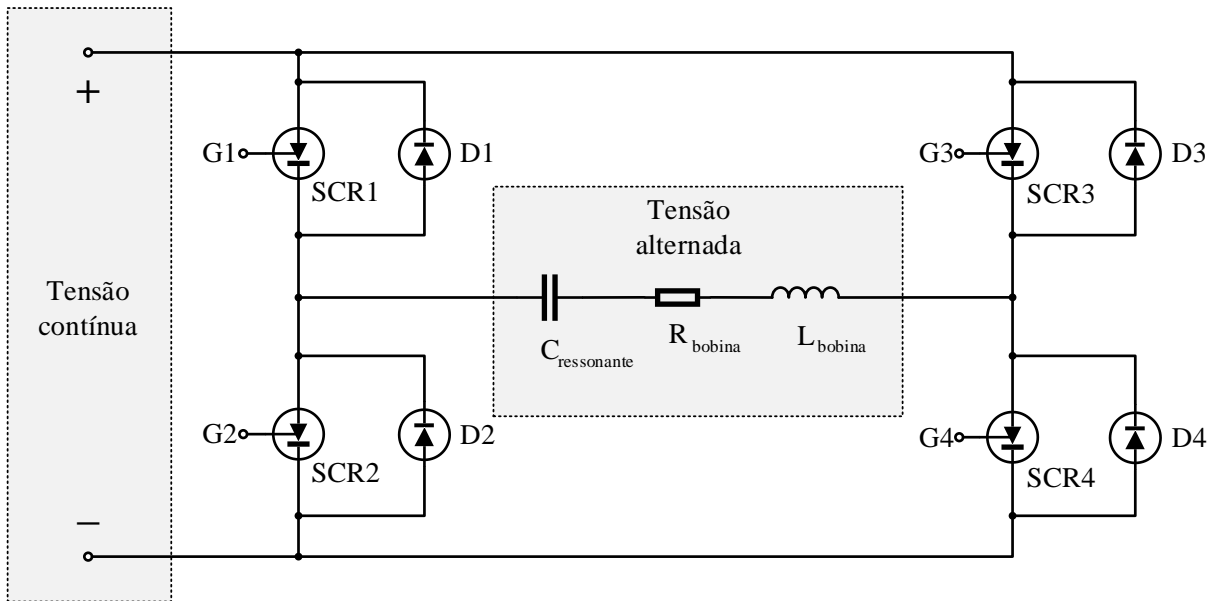


Figura 7 - Inversor monofásico em ponte com tiristores.

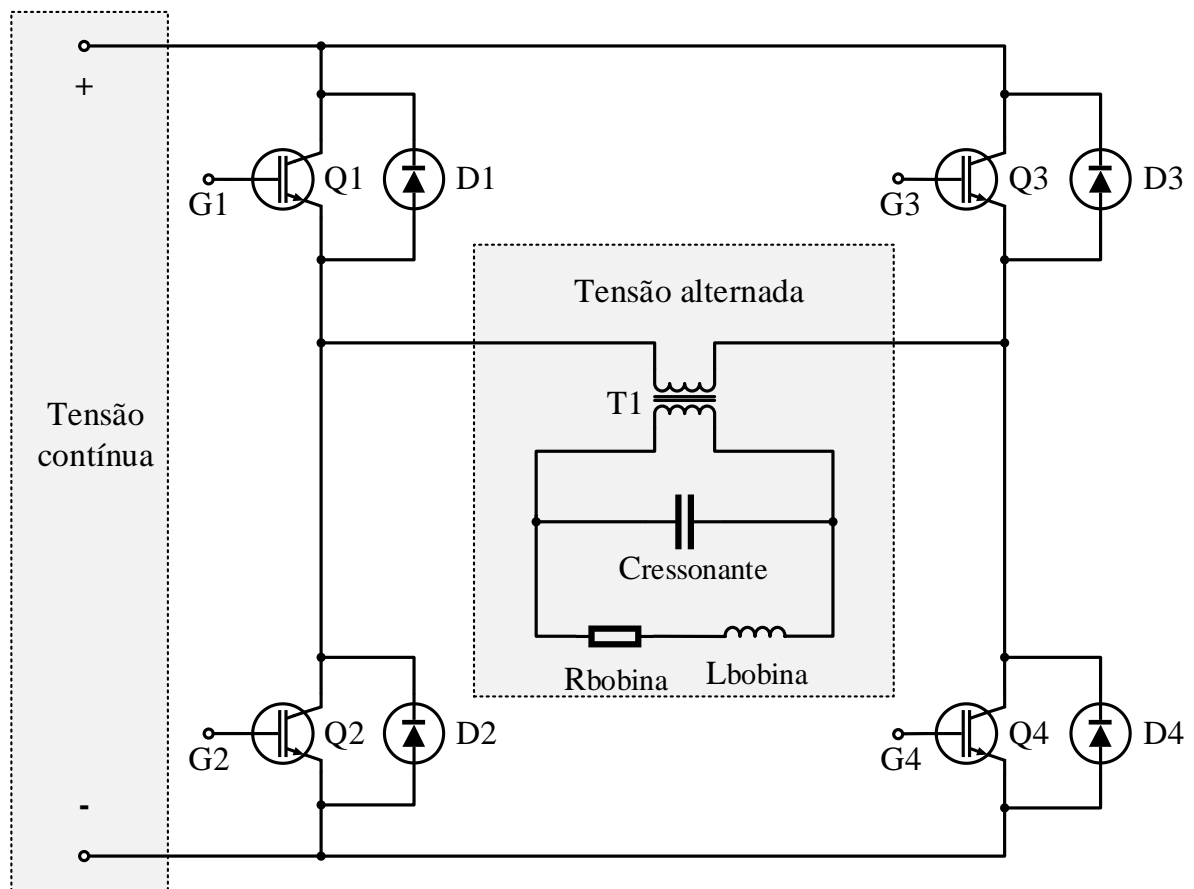


Figura 8 - Inversor monofásico em ponte com carga acoplada por transformador.

Também na Figura 8, é mostrada uma configuração usual, onde um transformador é inserido entre os dois braços da ponte inversora. Isto é utilizado para fazer com que seja



possível obter uma corrente alta na bobina do aquecedor, e conseqüentemente na peça de trabalho, com uma corrente menor circulando nos semicondutores do inversor. Ou seja, o primário do transformador, conectado à saída do inversor, terá tensão mais alta e corrente mais baixa em relação ao secundário, conectado à carga. Isto possibilita a redução de perdas e quedas de tensão [6], [16], [33].

### 2.2.4 Circuito *Snubber* RC

Outro circuito sempre presente neste tipo de máquina é o circuito *snubber* RC, mostrado na Figura 9, que serve para a proteção contra surtos de tensão, causados pela característica de chaveamento dos inversores. Estes circuitos são aplicados para a proteção das chaves semicondutoras, para absorver picos de tensão que seriam aplicados a estas chaves. São circuitos compostos por um resistor em série com um capacitor. A ausência deste circuito pode provocar a condução involuntária de um semicondutor devido a um pico de tensão [17], [31], [33].

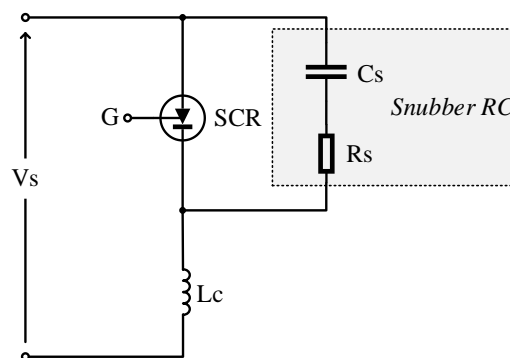


Figura 9 - Circuito *Snubber*.

O projeto de um circuito *snubber* é proposto em [34] e também discutido em [31], de modo que é possível calcular os valores da capacitância *snubber* ( $C_S$ ) e da resistência *snubber* ( $R_S$ ) a partir das equações (2.2.b) e (2.2.c), respectivamente. O cálculo proposto assume que a indutância do circuito ( $L_C$ ), a corrente de pico de recuperação da chave ( $I_R$ ) e a relação entre a tensão máxima e a tensão de entrada ( $V_P/V_S$ ) sejam pré-determinadas. Considerando um compromisso prático entre a tensão máxima de pico e a taxa de variação  $dv/dt$ , utiliza-se a curva de otimização proposta em [34], que pode ser vista na Figura 10, para determinar os parâmetros restantes.

$$C_S = L_C * \left[ \frac{I_R}{d * V_S} \right]^2 \quad (2.1. b)$$

$$R_S = 2 * \delta_a * \sqrt{\frac{L}{C_S}} \quad (2.1. c)$$

Onde:

$C_S$ : Capacitância *snubber* [F]

$L_C$ : Indutância do circuito [H]

$I_R$ : Corrente de pico de recuperação da chave [A]

$d_0$ : Fator de corrente ótimo

$V_S$ : Tensão de entrada [V]

$R_S$ : Resistência *snubber* [ $\Omega$ ]

$\delta_a$ : Fator de amortecimento

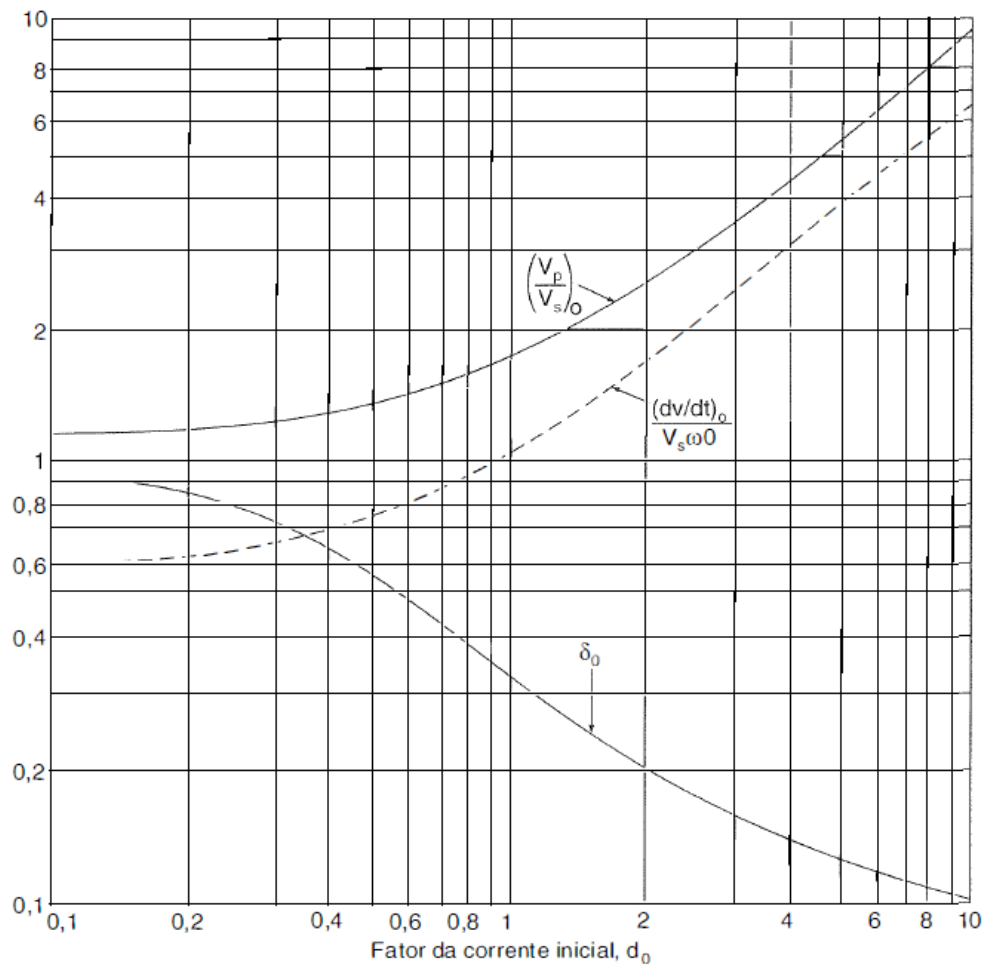


Figura 10 - Parâmetros ótimos do circuito *snubber* para projeto com compromisso.  
Fonte: [34].

### 3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma pesquisa exploratória sobre os conceitos inerentes do aquecimento por indução e uma pesquisa sobre as tecnologias que são utilizadas industrialmente nesse tipo de processo e suas características. Além disso, foi utilizado o software Simulink/Matlab para modelar computacionalmente um forno de indução e verificar o seu funcionamento e as estratégias de controle.

A pesquisa foi realizada com base em artigos científicos, livros, dissertações, manuais de operação e manutenção de equipamentos industriais, folhas de dados e desenhos elétricos de fornos de indução. Além disso, foram adicionados conhecimentos adquiridos em treinamento de manutenção em instalações de tratamento térmico por indução. Os dados foram separados de modo a identificar quais são as principais práticas aplicadas industrialmente e quais são as semelhanças e diferenças entre elas.

Através de simulações por software foram testados os principais circuitos aplicados em aquecimento por indução para auxiliar a compreensão da pesquisa realizada.

A metodologia utilizada está organizada a seguir:

1. Revisão bibliográfica;
2. Análise de aplicações industriais de aquecimento por indução;
3. Análise de técnicas de controle aplicadas em aquecimento por indução;
4. Modelagem computacional de um aquecedor indutivo;
5. Obtenção de parâmetros para o projeto térmico;
6. Obtenção de parâmetros para o projeto elétrico;
7. Modelagem computacional de um conversor aplicado em aquecimento por indução;
8. Obtenção de parâmetros para o projeto do controlador;
9. Modelagem computacional de um sistema controlado de aquecimento por indução;
10. Apresentação dos resultados de simulação computacional;
11. Análise dos resultados de discussões.

## 4 CARACTERÍSTICAS DE AQUECEDORES INDUTIVOS INDUSTRIAIS

Aquecedores indutivos são muito utilizados na indústria atualmente e podem aparecer de diversas formas e construções diferentes, as mais comuns serão abordadas neste capítulo.

### 4.1 TIPOS DE AQUECEDORES

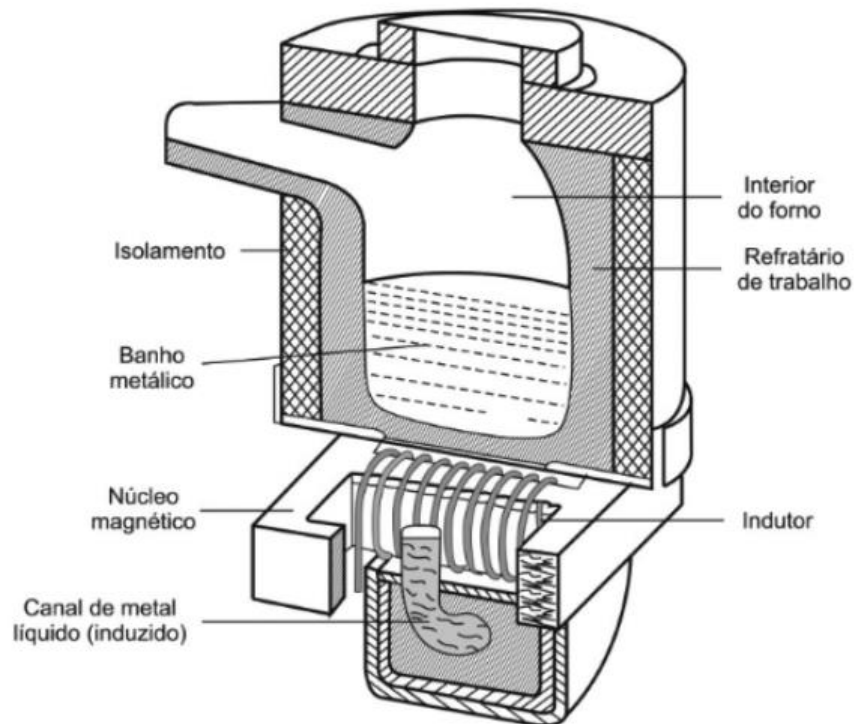
Máquinas de aquecimento por indução podem ser divididas em dois tipos principais de acordo com a aplicação, tendo em vista a sua forma construtiva: Máquinas para a fusão de metal e máquinas para aquecimento em geral, aplicadas em tratamento térmico, aquecimento em massa, indústria alimentícia, entre outros [6].

#### 4.1.1 Aquecedores para a fusão

Aquecedores utilizados para fusão são comumente chamados de fornos de indução, os quais possuem dois tipos básicos: Forno de indução a canal e forno de indução a cadinho. Os fornos de indução a canal são basicamente compostos de um reservatório de metal líquido que se comunica com as duas extremidades do canal, um canal cheio de metal líquido e uma bobina indutora enrolada em torno de um núcleo magnético. Neste caso o metal se aquece no canal e circula no estado líquido ao longo do mesmo, realizando a troca térmica e aquecendo o material desejado no interior do forno [4], [13]. A representação de um forno de indução a canal pode ser vista na Figura 11.

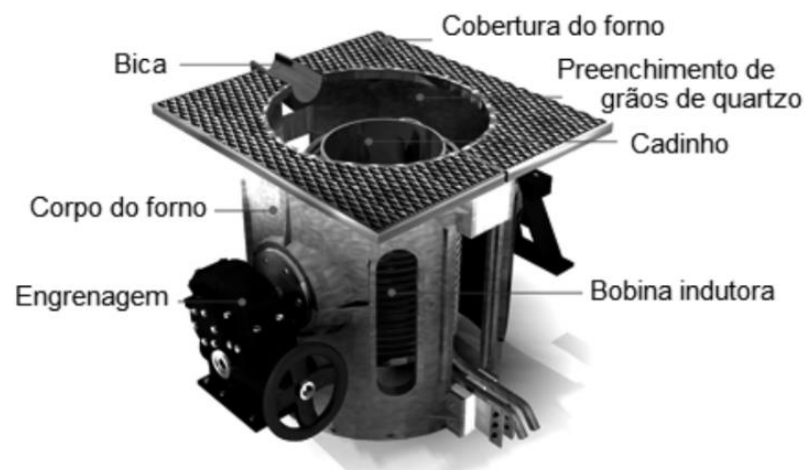
**Tabela 2 - Condições vantajosas para utilização de fornos de indução em fusão de metais.**

Forno de indução a canal	Forno de indução a cadinho
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos volumes de metal são desejados;</li> <li>• Um determinado produto é produzido;</li> <li>• Quedas de energia não são esperadas;</li> <li>• Uniformidade de temperatura não é crítica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Controle preciso de temperatura é necessário;</li> <li>• Geração de escória é alta;</li> <li>• São desejados menores custos de capital e instalação;</li> <li>• É necessária a capacidade de pré-fusão;</li> <li>• São esperadas interrupções de energia.</li> </ul>



**Figura 11 - Forno de indução a canal.**  
Fonte: [36].

O forno de indução a cadinho é constituído por uma bobina indutora que possui em seu interior um cadinho de material refratário, onde é colocada a carga metálica a ser fundida [35] e está representado na Figura 12. Neste caso a corrente induzida circula diretamente no material a ser fundido. A Tabela 2 reuniu as condições em que são mais vantajosos cada um destes tipos de fornos de acordo com [6].



**Figura 12 - Forno de indução a cadinho.**  
Fonte: [35].

#### 4.1.2 Aquecedores para tratamento térmico e aquecimento superficial

Aquecedores indutivos sem núcleo magnético podem ser construídos de tamanhos que variam de equipamentos portáteis até grandes instalações. São basicamente constituídos de uma bobina, geralmente refrigerada, na qual o material metálico é posicionado em seu interior para ser aquecido. A Figura 13 apresenta um exemplo de solda por brasagem à esquerda e outro de tratamento térmico à direita. Outras aplicações comuns para este tipo de aquecedor são: Forjamento, aquecedor de rolamentos, montagem por interferência de acoplamentos e flanges, desmontagem de sede de válvulas, aplicações domésticas, médicas, entre outros [6], [30], [37], [38].

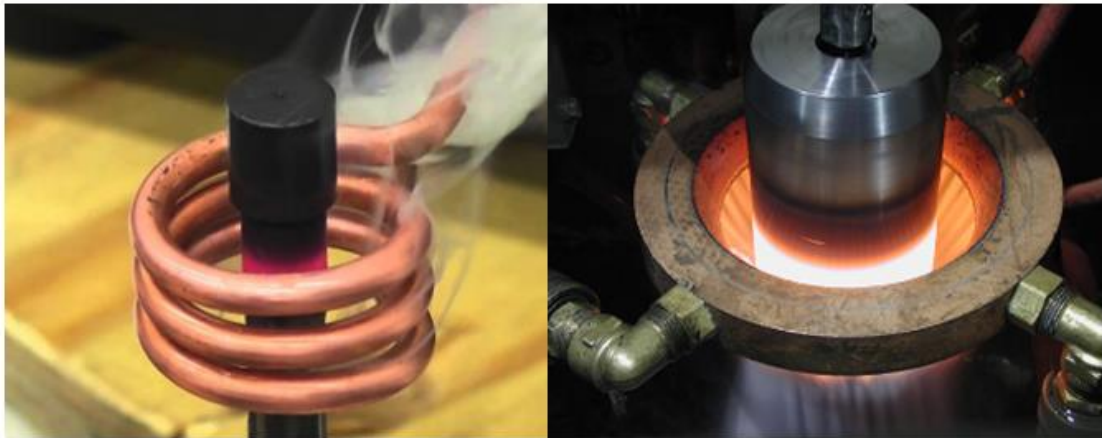


Figura 13 - Aquecedores indutivos sem núcleo.

#### 4.2 ELEMENTOS DE UM AQUECEDOR INDUTIVO INDUSTRIAL

Apesar da construção das máquinas de aquecimento indutivo variar de acordo com a aplicação, alguns componentes estão presentes em praticamente todas as aplicações industriais e possuem relevância para o estudo. São eles:

- Fonte de alimentação;
- Circuito de proteção;
- Unidade de refrigeração;
- Conversor de potência;
- Bobina do aquecedor.

#### 4.2.1 Fonte de alimentação

Máquinas industriais de aquecimento indutivo geralmente demandam uma alta potência para o funcionamento, sendo assim, a fonte de alimentação é um ponto importante do projeto. Na maioria das aplicações industriais é utilizada uma fonte de alimentação trifásica, a qual será aplicada a um retificador para gerar uma tensão contínua (*link CC*) [4], [6], [9], [18]. O fato de se utilizar uma rede trifásica reduz o *ripple* na saída do retificador, pela característica do retificador trifásico em relação ao monofásico [25], [31].

Um circuito aplicado na alimentação elétrica para reduzir esse *ripple* é mostrado na Figura 14 e consiste na utilização de um transformador hexafásico com três fases de saída configuradas em triângulo, e as outras três configuradas em estrela.

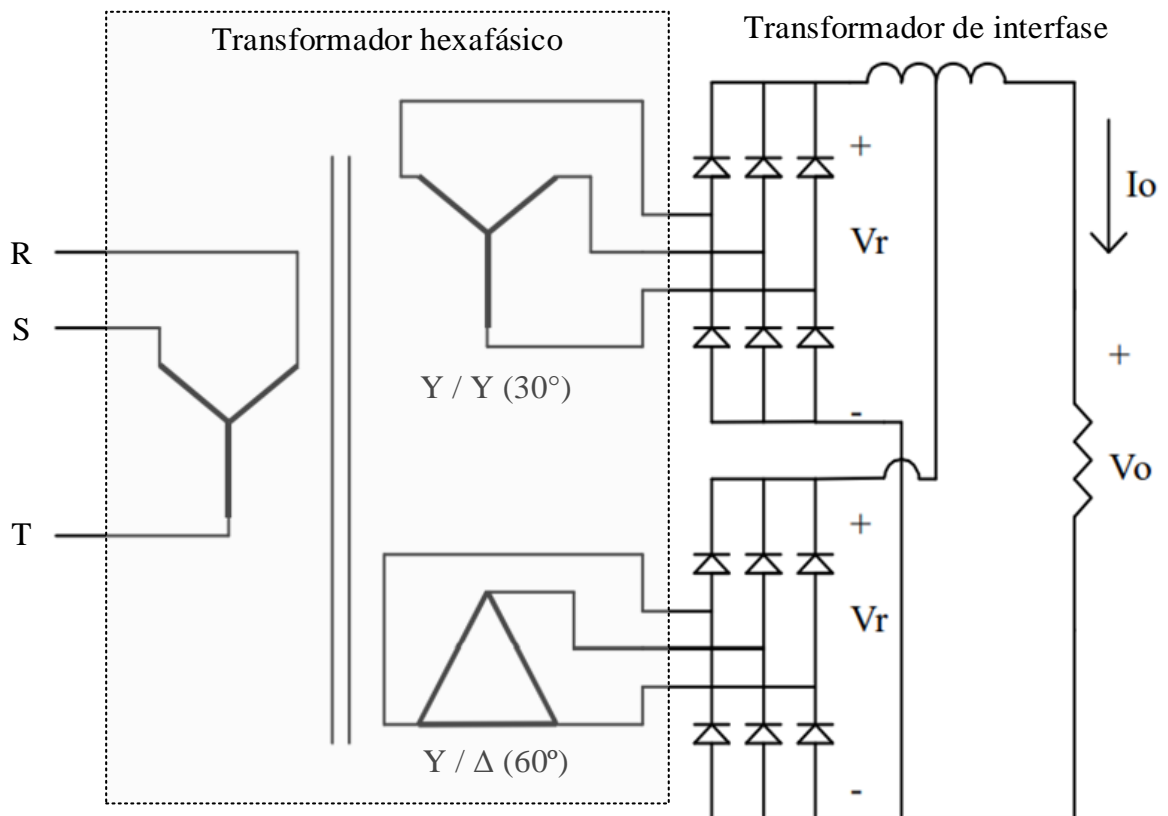


Figura 14 - Retificador com transformador hexafásico.  
Fonte: Adaptado de [40].

Esse circuito gera, a partir de uma rede trifásica, dois conjuntos de três fases com defasamento de 30° entre si. Em seguida são aplicadas três fases em um retificador e as outras três em outro, e a saída dos retificadores é interligada em paralelo, conforme pode ser visto na

Figura 14. Isto faz com que o *ripple* de saída seja reduzido, com isso, pode-se aplicar capacitores menores no circuito intermediário e atingir um bom nível de tensão CC. Além disso, em determinadas situações pode ser conveniente utilizar uma associação de circuitos retificadores, como por exemplo, quando se deseja reduzir o conteúdo harmônico da corrente drenada da rede [40], [41]. O transformador de interfase representado na Figura 14 faz-se necessário devido à diferença instantânea entre as tensões na saída de cada um dos retificadores [40].

É fácil perceber que a ondulação da forma de onda de tensão com a utilização deste circuito será significativamente reduzida, conforme visto na Figura 15.

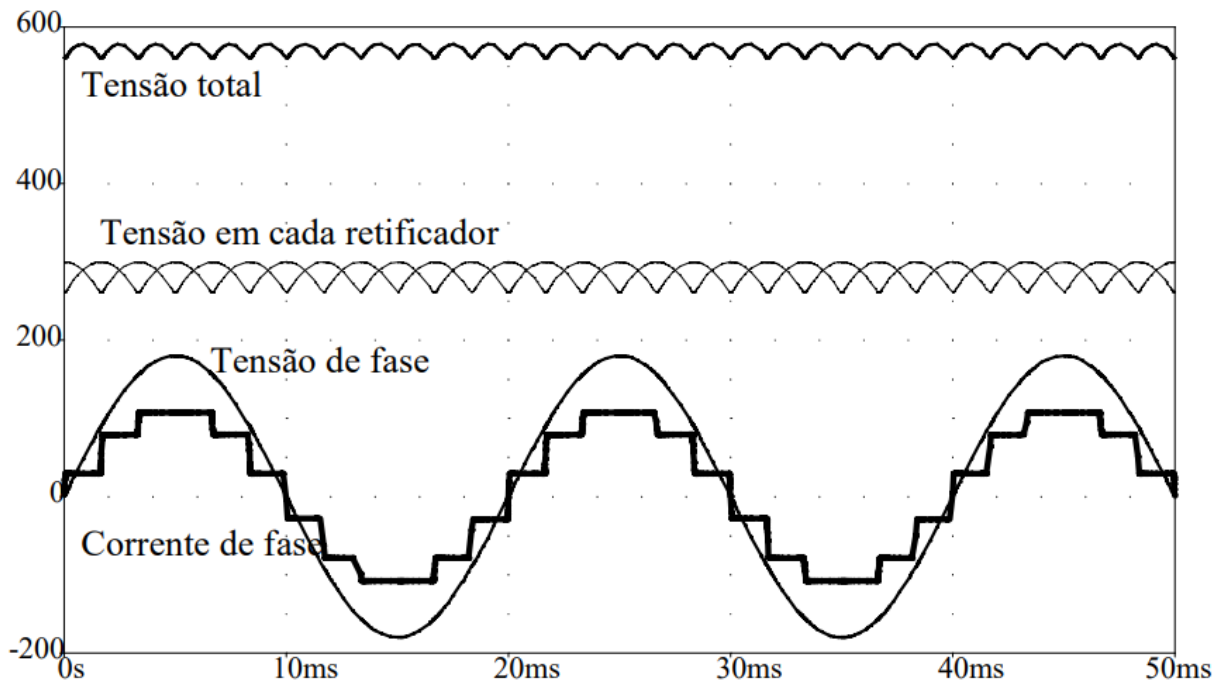


Figura 15 - Forma de onda de um retificador com transformador hexafásico.  
Fonte: [40].

#### 4.2.2 Proteção

Por se tratar de máquinas alimentadas por circuitos de alta potência de alimentação, vários sistemas de segurança e proteção são instalados. O desligamento para a proteção do equipamento pode ser feito por disjuntores de proteção, fusíveis ou em muitos casos pelo próprio circuito retificador ou inversor. Em algumas aplicações, mesmo quando não se utiliza controle no estágio retificador, este é construído com semicondutores controlados, isto porque



estes possuem uma resposta muito rápida, às vezes mais rápida que disjuntores ou fusíveis de proteção [32].

Quando se aplica um retificador com tiristores do tipo SCR, caso não sejam enviados os pulsos para os SCRs, estes não entram em condução, logo, em uma situação de curto-circuito, ao ser detectado um aumento excessivo da corrente do equipamento ou um afundamento de tensão no circuito intermediário, os pulsos podem ser cortados imediatamente e no semi-ciclo seguinte da tensão de alimentação os SCRs do retificador já não conduzirão. Este tipo de proteção provavelmente atuará antes de disjuntores e fusíveis, preservando o equipamento [42].

Além disso, para a proteção dos operadores da máquina, são aplicados circuitos como detecção de fuga à terra, para evitar choques ou curtos-circuitos monofásicos, monitoração de portas de painéis elétricos abertas ou fechadas, para desligar o equipamento ou evitar que o mesmo seja ligado de modo inseguro, barreiras para a blindagem magnética e isoladores para que os operadores não sejam expostos a altos campos que possam ser prejudiciais à saúde [6], [42].

#### **4.2.3 Unidade de refrigeração**

As correntes nos condutores do circuito geralmente são altas, o que provoca o seu aquecimento, sobretudo onde se emprega frequências mais altas, em que, por causa do efeito pelicular, a corrente circula em uma área de seção menor, assim torna-se necessário realizar a refrigeração dos cabos do conversor, dos barramentos e da própria bobina do aquecedor.

A refrigeração é feita utilizando-se cabos ocos, por onde circula água, ou mangueiras com os cabos em seu interior com o mesmo propósito. Em muitos casos os barramentos são refrigerados também com circulação de água, podendo ser construídos com tubos ou perfis quadrados, assim como as bobinas de aquecimento, e serem conectados a um sistema de refrigeração por mangueiras de material isolante. Pode-se ainda utilizar componentes como capacitores ou transformadores refrigerados a água [4], [10], [16], [18]. Um exemplo de cabo refrigerado a água é apresentado na Figura 16.

O circuito fechado de água troca calor com um circuito de água industrial, promovendo a refrigeração dos componentes necessários do circuito elétrico. Existem circuitos que monitoram a pressão do circuito de refrigeração, além de temperatura e vazão da água [42].

Uma preocupação existente neste tipo de refrigeração é a eletrólise, que pode acontecer entre circuitos unidos por mangueiras de refrigeração. Nos casos em que existe diferença de potencial elétrico CC entre dois pontos conectados por uma mangueira de refrigeração, essa diferença de potencial pode fazer com que circule corrente através da água da mangueira, a qual pode causar eletrólise. A eletrólise ao longo do tempo irá corroer o metal em um lado do circuito, o que pode ocasionar vazamentos, e irá depositar este material na outra extremidade do circuito, o que pode ocasionar obstruções. Em ambos os casos, existem riscos para a segurança da instalação. Para evitar que isso ocorra, é necessário que a água utilizada para refrigerar barramentos e cabos elétricos possua baixa condutividade, sendo destilada ou deionizada, ou que as mangueiras entre dois pontos com potencial CC possuam comprimento suficiente para evitar a ocorrência da eletrólise [6].



Figura 16 - Cabo elétrico refrigerado a água.

#### 4.2.4 Conversor de potência

O conversor de potência está sempre presente nessas máquinas, pode ser constituído por um retificador e um inversor, ou somente por um inversor, caso a fonte de alimentação seja de tensão contínua. Em muitos casos, o conversor de potência é refrigerado a água em seus componentes e barramentos e também é instalado em painéis com proteções e circuitos de segurança que monitoram a instalação como um todo, como o mostrado na Figura 17. Com tais proteções, essas máquinas podem ser instaladas em ambientes industriais agressivos.

A escolha do semicondutor utilizado passa pela definição do projeto do conversor e do circuito de carga, tendo como fator principal a frequência de operação. Tiristores geralmente são utilizados para altas potências e frequências mais baixas, enquanto que os transistores são preferidos quando são necessárias frequências mais altas ou potências baixas, devido à sua capacidade de comutação rápida e com baixas perdas [6]. De acordo com [30], tiristores são utilizados em frequências de até 3 KHz para potências até na ordem de MW, IGBTs são aplicados em frequências até 150 KHz e potências até 3 MW, enquanto que MOSFETs são usados em frequências até na ordem de centenas de KHz e potências inferiores a 500 KW.



**Figura 17 - Paineleltrico de conversor de potncia.**

Podem ser aplicados conversores com o estgio inversor alimentado em tenso ou em corrente [7], [43]. Inversores alimentados em tenso possuem um ou mais capacitores de alta capacitncia em paralelo com o *link* CC, de modo que a tenso de alimentao do inversor praticamente constante durante toda a sua operao, mesmo com a variao de carga. Analogamente, inversores alimentados em corrente possuem um ou mais indutores de alta indutncia em srie com o *link* CC, de modo que a corrente fornecida ao inversor ter um valor praticamente constante, mesmo sob carga [6], [44]. Por este motivo, inversores alimentados em tenso podem ser controlados em tenso em malha aberta, mas no podem ser controlados em corrente, pois no h a estabilidade da corrente em sua entrada, mais uma vez, o inverso vlido, sendo que inversores alimentados em corrente no apresentam boa resposta para o controle de tenso em malha aberta [45], [46].

A topologia de um conversor com inversor alimentado em tenso mostrada na Figura 18(a) e outro com inversor alimentado em corrente mostrado na Figura 18(b).

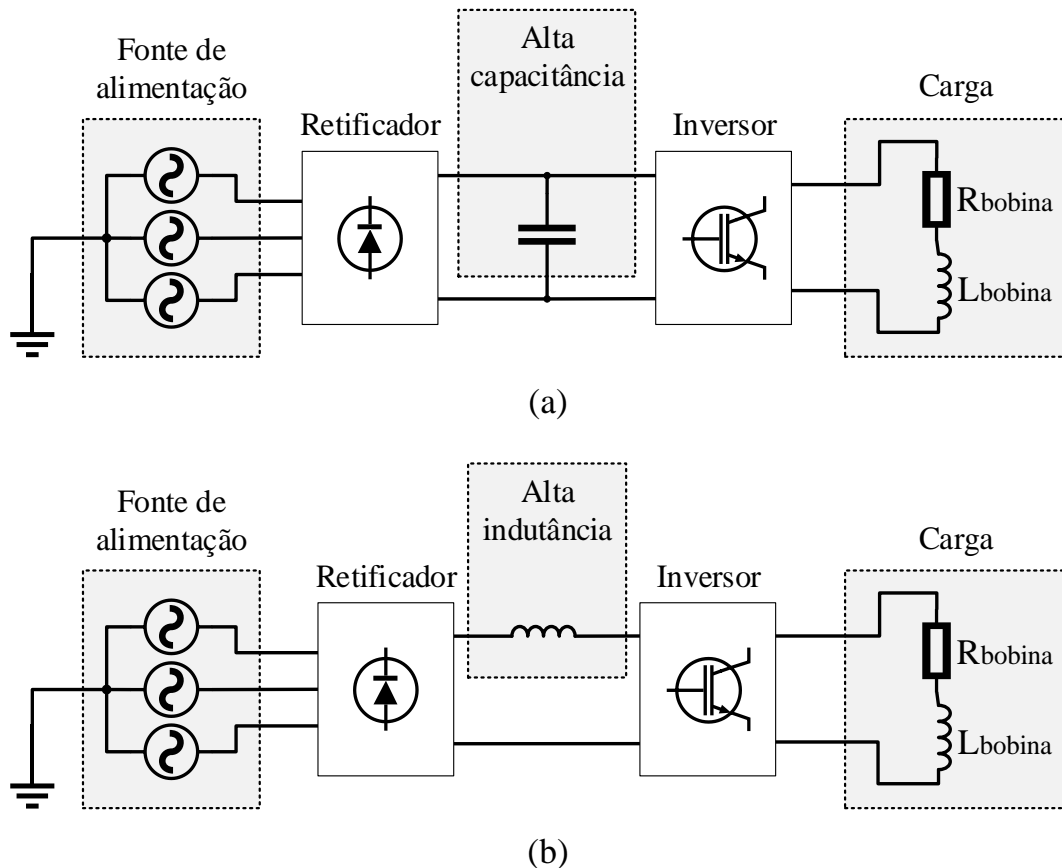


Figura 18 - Inversor alimentado em tensão (a), Inversor alimentado em corrente (b).

Os conversores podem ser configurados de diversas formas, apresentando diferenças tanto para o estágio retificador, quanto para o estágio inversor. A Figura 19 apresenta um panorama de utilização dessas configurações em aplicações de tratamento térmico por indução.

Como pode ser visto na Figura 19, pode-se dividir os conversores de acordo com a sua topologia primeiramente a partir de sua fonte de alimentação, sendo em tensão ou em corrente. A fonte CC descrita na imagem é referente ao circuito retificador, sendo que esta pode ser variável, para controle de potência, ou fixa. Fontes CC variáveis são obtidas a partir de retificadores controlados. Nota-se que quando o controle de potência não é realizado no estágio retificador, este deve necessariamente ser feito no estágio inversor. Além disso, em aplicações de tratamento térmico por indução, existem máquinas que controlam o fator de potência para reduzir perdas. Por fim, a forma de conexão entre a carga, o circuito ressonante e o conversor é também relevante para o funcionamento do mesmo, sendo que em tratamento térmico são aplicadas as configurações série, paralela e série-paralela [6]. A escolha da configuração a ser aplicada depende principalmente do nível de potência, frequência de operação, custo e segurança [6].

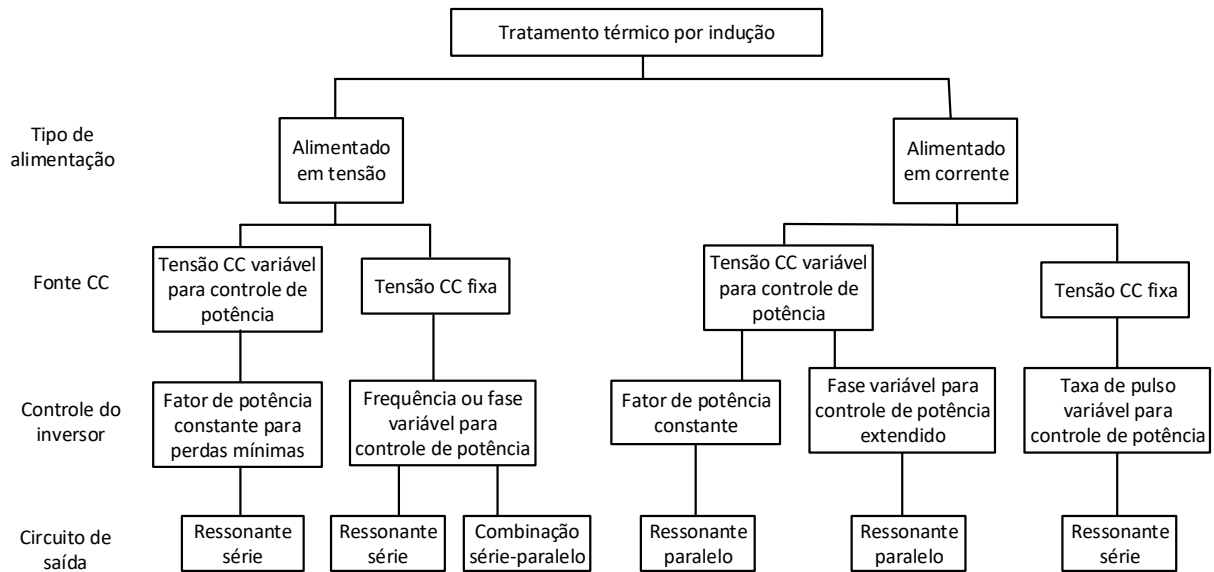


Figura 19 - Conversores utilizados em tratamento térmico por indução.  
Fonte: Adaptado de [6].

#### 4.2.5 Bobina do aquecedor

A bobina do aquecedor é parte fundamental do projeto do mesmo, uma vez que ela faz parte do circuito elétrico da máquina e do circuito término. A bobina pode ser construída em diversos formatos, de acordo com a forma que se deseja o campo magnético gerado por ela, o que está relacionado como o perfil do aquecimento, como é representado na Figura 20. Para isto é necessário levar em conta o formato e o material da peça a qual será trabalhada na máquina, e na grande maioria dos casos, também, é refrigerada à água [10], [13].

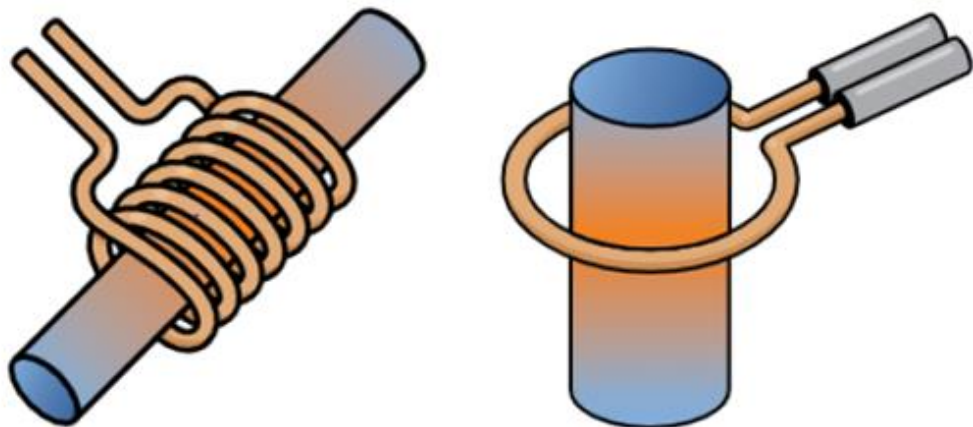


Figura 20 - Tipos de formatos de bobinas de indução.  
Fonte: [2].

## 5 TÉCNICAS DE CONTROLE EM AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

O processo de aquecimento por indução sofre influência da peça de trabalho que está sendo aquecida. Quando esta muda seu formato ou a quantidade de material imerso no campo magnético, ocorre a mudança da indutância mútua entre a peça de trabalho e a bobina do forno. Além disso, em aplicações que ultrapassam a temperatura de Curie de um material magnético ou ferromagnético, a dissipação de calor na peça muda, devido a não ter mais perdas por histerese magnética. Assim sendo, faz-se necessário a utilização de um sistema de controle para obter bons resultados nos processos.

O controle dos equipamentos de aquecimento por indução é feito através do conversor de potência. Podendo ser aplicadas técnicas de controle tanto no estágio retificador, quanto no estágio inversor, como também em ambos simultaneamente.

Em instalações de aquecimento por indução pode ser interessante controlar várias variáveis, individualmente ou em conjunto. Geralmente podem ser controladas as variáveis:

- Temperatura;
- Tensão elétrica;
- Corrente elétrica;
- Potência elétrica;
- Frequência elétrica;
- Fase entre o chaveamento e o circuito ressonante.

A maioria dessas variáveis é controlada em malha fechada, onde, a partir da sua medição, tem-se a realimentação para o controlador e a geração do sinal de erro. Para isto são utilizados sensores para medir a temperatura da peça aquecida, transformadores de corrente e de tensão para medir respectivamente corrente e tensão na saída do inversor, além de circuitos eletrônicos que permitem identificar a frequência e a fase a partir dos sinais de tensão e/ou corrente [6].

A Figura 21 apresenta a topologia de aquecedor com inversor alimentado em tensão e resume as possibilidades de controle utilizadas neste. A seta que direciona ao retificador indica que a variável pode ser controlada atuando-se no retificador. Da mesma forma, a seta que direciona ao inversor indica que o controle da variável pode ser feito por ele. Não necessariamente todos estes controles precisam ser implementados e a sua escolha depende da aplicação, podendo ser implementados juntos ou separados [47].

## Aquecedores Indutivos

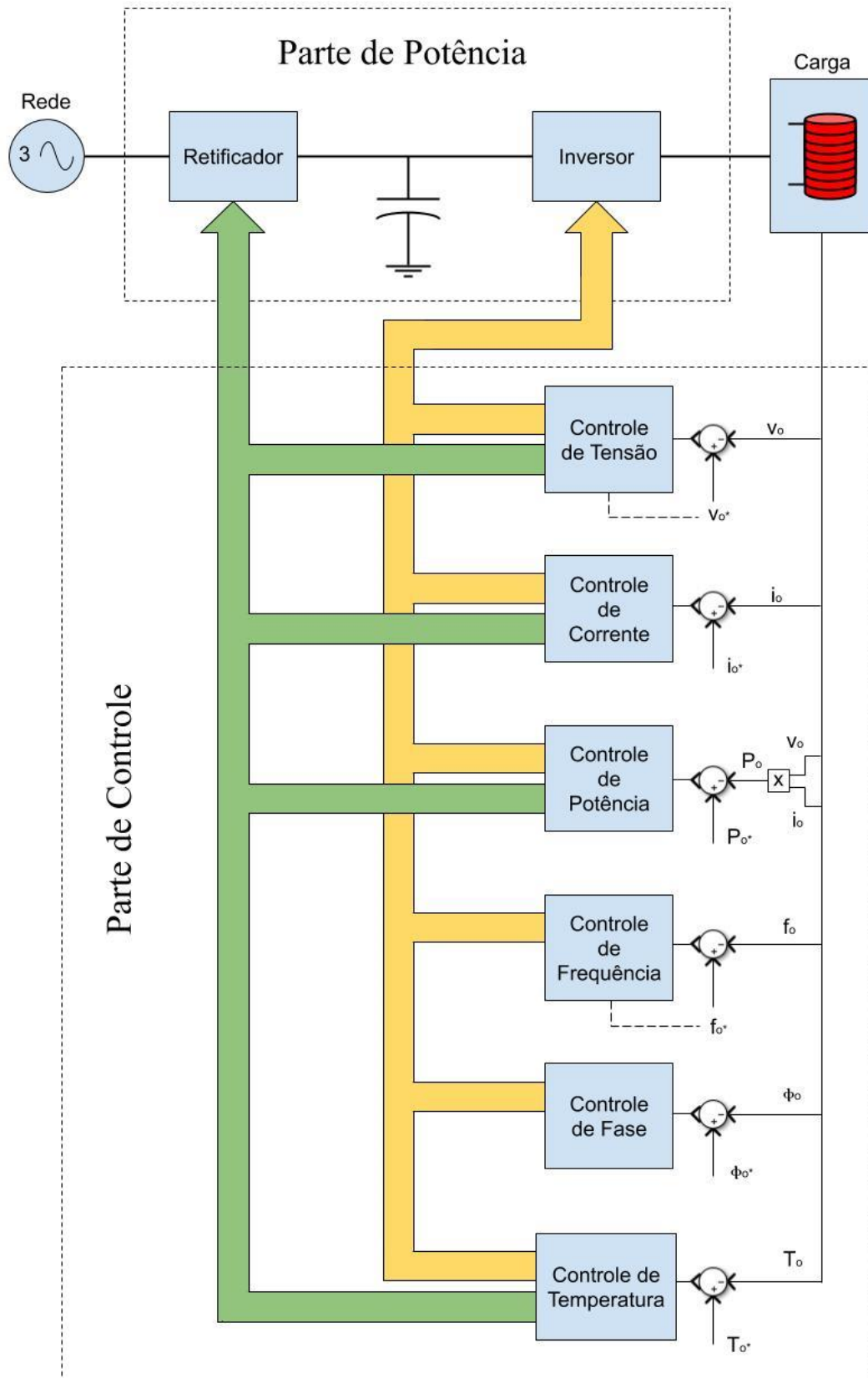


Figura 21 - Malhas de controle possíveis para aquecimento por indução.

Uma vez que um equipamento de aquecimento por indução está bem ajustado, este apresenta resultados com alta repetibilidade, ou seja, aplicando-se uma mesma potência a peças de mesmo formato, o resultado será praticamente o mesmo. Isto permite que se faça tratamento térmico sem realizar medição de temperatura. Apenas aplicando uma mesma potência definida previamente e verificando periodicamente os resultados. De modo geral, os tratamentos térmicos por indução, principalmente tratamentos superficiais, são executados muito rapidamente, em questão de segundos dependendo da peça, e a medição de temperatura durante o processo seria inviável, por isso controlar o processo através de outros parâmetros é uma boa alternativa [6], [30].

## 5.1 TÉCNICAS APLICADAS AO ESTÁGIO RETIFICADOR

Algumas técnicas de controle podem ser aplicadas atuando-se no circuito retificador, para isso este retificador precisa ser um retificador controlado. Assim como pode ser visto na Figura 21, é possível controlar tensão, corrente, potência e temperatura pelo retificador.

É possível realizar o controle pelo retificador ajustando o ângulo de disparo, no caso de tiristores, e/ou o ângulo de corte para as demais chaves semicondutoras, controlando assim a tensão média no *link* CC. Com isso, o inversor pode operar em uma frequência fixa que ainda assim será possível controlar a potência fornecida à carga.

Na referência [48] é proposto um controle de potência no retificador em cascata com um inversor em ponte, ou seja, os dois estágios atuam para controlar a potência. Além disso, existe também uma malha fechada de controle de temperatura para melhorar a repetibilidade do controle constante de temperatura. Nas referências [49] e [50] são propostos controles de corrente em malha fechada atuando-se no retificador.

## 5.2 TÉCNICAS APLICADAS AO ESTÁGIO INVERSOR

No estágio inversor é possível controlar tensão, corrente, potência, temperatura, frequência e ângulo de fase.

Nas referências [7], [17], [22], [37], [38], [43] e [48] são propostos o controle de potência em malha fechada atuando-se no inversor. Uma das formas de atuar no inversor para realizar o controle de potência é utilizando a modulação por largura de pulso único, utilizando



chaves a IGBT graças à sua capacidade de interromper a condução de forma controlada. Neste caso é ajustada a variação da duração do tempo de condução dos IGBTs, controlando a energia fornecida à carga.

Outra técnica que pode ser utilizada em máquinas que utilizam inversores a IGBT, conhecida como PWM linear, consiste em comparar um sinal de referência com um sinal triangular simétrico, cuja frequência determina a frequência de chaveamento. Neste caso, a frequência da onda triangular deve ser no mínimo 20 vezes superior à frequência da tensão de referência para se obter uma boa reprodução desta. Alterando a amplitude ou a frequência deste sinal de referência, altera-se também a frequência e a amplitude das tensões e correntes sintetizadas pelo inversor [9], [45].

Com o uso de inversores em ponte a SCR, tendo como carga um circuito ressonante série, como foi apresentado na Figura 7, é possível controlar a potência transferida à carga através do ajuste do tempo morto entre a condução dos dois braços da ponte, como pode ser visto na Figura 22. É possível perceber que a corrente eficaz na carga diminuirá à medida que o tempo morto aumenta.

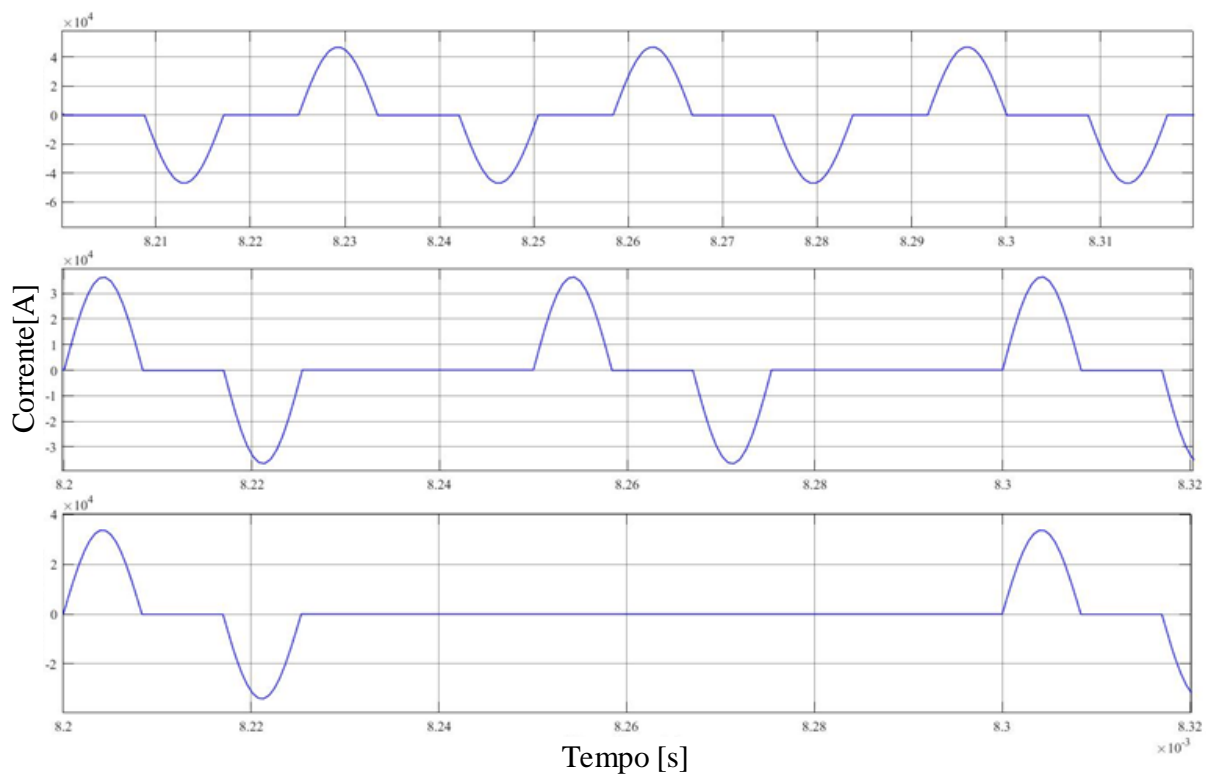


Figura 22 - Variação do tempo morto.

O controle da frequência pode ser feito pelo inversor, e pode ser interessante em aplicações de tratamento térmico superficial, em que só uma camada superficial da peça

precisa ser tratada. Assim, pode-se ajustar a frequência para manter uma determinada profundidade de penetração. Geralmente este controle é combinado com outro, porque além do controle da frequência da corrente na carga, também é necessário controlar o aquecimento, então pra isso se torna necessário controlar a tensão, corrente ou potência na carga [7], [38].

O controle de fase é proposto nas referências [17], [23], [38] e [49], com o intuito de fazer com o que inversor comute as chaves no momento em que a corrente ou a tensão estiver passando por zero. Como foi citado anteriormente, está técnica é chamada de comutação suave e reduz as perdas de chaveamento, para isso é necessário utilizar um circuito ressonante.

## 6 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM AQUECEDOR INDUTIVO

Neste capítulo será adaptado o projeto de um forno de indução proposto em [3] para realizar o recozimento pleno de uma peça de alumínio com as seguintes características:

- Massa (m) = 4 Kg
- Temperatura de recozimento = 350 °C = 623,15 K
- Temperatura ambiente = 25 °C = 298,15 K
- Camada mínima de tratamento = 1 mm
- Calor específico do alumínio = 910 J/Kg.K
- Permeabilidade magnética relativa do alumínio ( $\mu_r$ ) = 1,000021
- Densidade do alumínio (d) = 2,7 g/cm<sup>3</sup>
- Resistividade elétrica do alumínio a 350 °C ( $\rho$ ) =  $5,8 \times 10^{-8} \Omega.m$

Será simulado o seu comportamento através do Simulink/Matlab para demonstrar a característica do cálculo e das formas de onda de tensão e corrente na carga.

A Figura 23 mostra a visão geral da instalação proposta para este aquecedor. Note que foi escolhido utilizar uma fonte de alimentação CC para simplificar as análises e simulações, esta alimenta um inversor monofásico em ponte, com chaves a IGBT, conectado a uma carga ressonante em série.

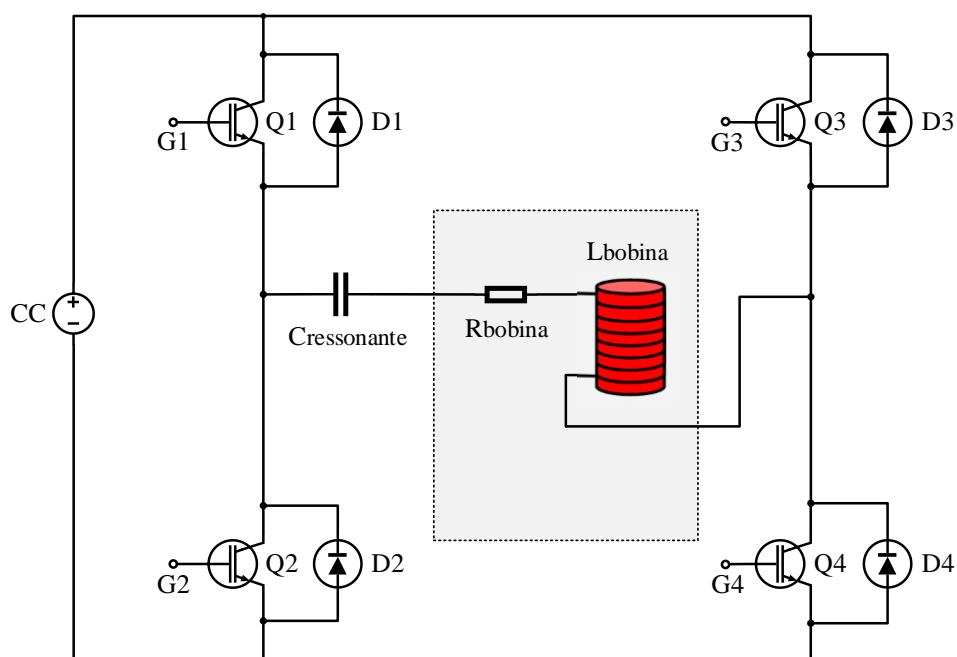


Figura 23 - Sistema de aquecimento por indução.

- Projeto mecânico:

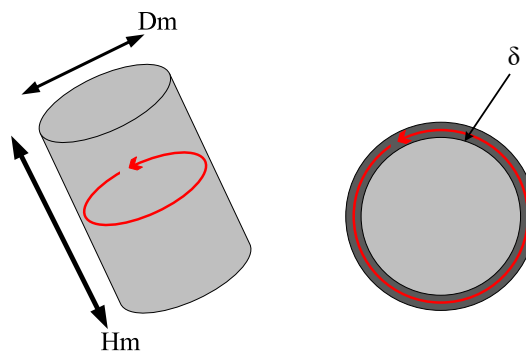
A primeira etapa do dimensionamento consiste no projeto mecânico do forno, que contempla a definição da sua capacidade volumétrica, do seu formato e das suas dimensões. Em [3] foi escolhido o forno do tipo a cadinho, que foi apresentado no capítulo 4 deste trabalho, e dimensionado o mesmo para a capacidade de 4 Kg de alumínio fundido e com formato cilíndrico, para receber uma bobina helicoidal ao seu redor.

Uma consideração importante é que no caso de uma bobina helicoidal a sua altura deve ser maior que o seu diâmetro, para que as linhas de fluxo magnético se concentrem em seu interior [3]. As características construtivas do forno proposto em [3] e as dimensões do material utilizado no mesmo estão descritas na Tabela 3. Será assumido que a peça de alumínio para a qual o tratamento térmico aqui proposto foi elaborado possui as mesmas dimensões propostas por [3].

**Tabela 3 - Projeto mecânico do forno de indução para aquecimento de alumínio.**  
Fonte: Adaptado de [3].

Parâmetros	Valor	Unidade
Volume da carga ( $V_m$ )	1600	$\text{cm}^3$
Diâmetro da peça ( $D_m$ )	10,75	cm
Altura da peça ( $H_m$ )	17,20	cm
Diâmetro interno da bobina ( $D_{in}$ )	12,02	cm
Altura da bobina ( $H_{in}$ )	18,93	cm

A peça de alumínio a ser tratada termicamente está representada na Figura 24, o detalhe à direita mostra a visão superior da peça e salienta a camada superficial que irá receber o tratamento. Em vermelho está representada a corrente induzida na peça e o seu sentido de circulação.



**Figura 24 - Peça de alumínio para tratamento de recozimento pleno.**

- Estimativa da potência necessária:

A potência necessária a ser transferida para a peça de trabalho pode ser calculada a partir do calor necessário para realizar a mudança de temperatura no tempo desejado. Iniciando da temperatura ambiente até atingir a temperatura de recozimento do alumínio será necessário transferir a quantidade de calor conforme o cálculo abaixo:

$$Q = m * c * \Delta T$$

$$Q = 4 * 910 * (623,15 - 298,15)$$

$$Q = 1183 \times 10^3 J$$

Admitindo-se que o tratamento será realizado em 18 minutos, ou seja, 1080 segundos, pode-se calcular a potência necessária para tal:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{1183 \times 10^3}{1080} = 1095,37 W$$

Essa potência será dissipada por efeito Joule na peça de trabalho, através da corrente induzida passando pela resistência elétrica da peça. Isto irá promover o aquecimento necessário.

- Projeto elétrico:

Para desenvolver o projeto elétrico, primeiramente será obtida a frequência de operação do inversor com base na camada mínima definida para o tratamento térmico ( $f_R$ ), em seguida será calculada a resistência elétrica da peça ( $R_{peça}$ ), a corrente elétrica que irá percorrê-la ( $I_{peça}$ ), a densidade máxima do fluxo magnético ( $B_P$ ) e a corrente elétrica na bobina necessária para gerar tal fluxo ( $I_{bob}$ ). Por fim serão calculados os valores da resistência elétrica equivalente ( $R_{eq}$ ), indutância equivalente ( $L_{eq}$ ) e capacitância de ressonância ( $C_{res}$ ) do circuito elétrico equivalente.

De acordo com a Tabela 4, presente em [6], que relaciona a frequência com a profundidade de penetração para alguns materiais, tem-se que a frequência ideal é de 10 KHz para fazer o tratamento térmico de uma camada mínima de 1 mm na peça de trabalho, considerando uma aproximação para a temperatura de 250 °C. A camada de penetração ( $\delta$ ) da corrente para uma frequência de 10 KHz será de 1,16 mm.

**Tabela 4 - Profundidade de penetração para o alumínio.**  
**Fonte: Adaptado de [6].**

Metal	Temperatura		Frequência (KHz)				
	°C	F	4	8	10	30	70
Alumínio	20	68	1,30 mm	0,92 mm	0,83 mm	0,48 mm	0,31 mm
	250	482	1,83 mm	1,29 mm	1,16 mm	0,67 mm	0,44 mm
	500	932	2,35 mm	1,66 mm	1,48 mm	0,86 mm	0,56 mm

A partir das características físicas da peça de trabalho é possível calcular a sua resistência à passagem da corrente elétrica. Considerando essa corrente circulando no sentido representado na Figura 24 pela camada da profundidade de penetração de 1,16 mm, obtida pela Tabela 4, a resistência elétrica da peça pode ser calculada por:

$$R_{peça} = \frac{l * \rho}{A}$$

$$R_{peça} = \frac{2 * \pi * r * \rho}{H_m * \delta}$$

$$R_{peça} = \frac{\pi * D_m * \rho}{H_m * \delta}$$

$$R_{peça} = 98,17 \mu\Omega$$

A corrente induzida que circulará na peça de trabalho para promover o aquecimento está relacionada com a potência que será dissipada na peça e pode ser calculada por:

$$I_{peça} = \sqrt{\frac{P}{R_{peça}}} = 3,34 \text{ KA}$$

A bobina do forno é modelada como um solenoide a fim de realizar o cálculo da densidade de fluxo em seu interior [3], [18]. Com as considerações feitas até então, o desenvolvimento matemático presente na referência [3] fornece uma forma de calcular a densidade máxima de fluxo magnético. Tendo como base a relação entre o fluxo magnético no interior da bobina e tensão induzida por este fluxo, é possível definir o cálculo para a densidade de fluxo.

O fluxo magnético é definido por:

$$\varphi_p = B_p * A$$

$$\varphi = B_p * A * \text{sen}(w * t)$$

Considerando que a tensão induzida é dada por  $e = d\varphi/dt$ , tem-se a tensão induzida eficaz como:

$$e = \frac{d\varphi}{dt} = A * w * B_p * \text{cos}(w * t)$$

$$E = \frac{e}{\sqrt{2}} = \frac{A * w * B_p}{\sqrt{2}}$$

$$B_p = \frac{E * \sqrt{2}}{A * w}$$

Tendo em vista que a tensão induzida eficaz na peça de trabalho por ser representada por  $E = \sqrt{P * R_{peça}}$  e que a área percorrida pelo campo magnético no interior da bobina é dada por  $A = H_m * \delta$ , pode-se deduzir a equação para cálculo da densidade máxima de fluxo magnético:

$$B_p = \frac{\sqrt{P * R_{peça}} * \sqrt{2}}{A * w} = \sqrt{\frac{P * R_{peça} * 2}{A^2 * w^2}}$$

$$B_p = \sqrt{\frac{P * R_{peça} * 2}{(H_m * \delta)^2 * (2 * \pi * f)^2}}$$

$$B_p = 36,994 \times 10^{-3} \text{ T}$$

Como discutido em seções anteriores, a interação entre a bobina do aquecedor e a peça de trabalho pode ser interpretada como um transformador, em que a peça de trabalho se comporta como uma bobina em curto no enrolamento secundário.

Em [3], o modelo equivalente elétrico do forno de indução é desenhado conforme a Figura 25. Para efeito de cálculo, a indutância e a resistência da peça de trabalho são referidas em relação ao primário do transformador. A corrente  $I$ , por indutância de magnetização, é muito menor em comparação à corrente  $I_{peça}/N$ , por isso é negligenciada [3].

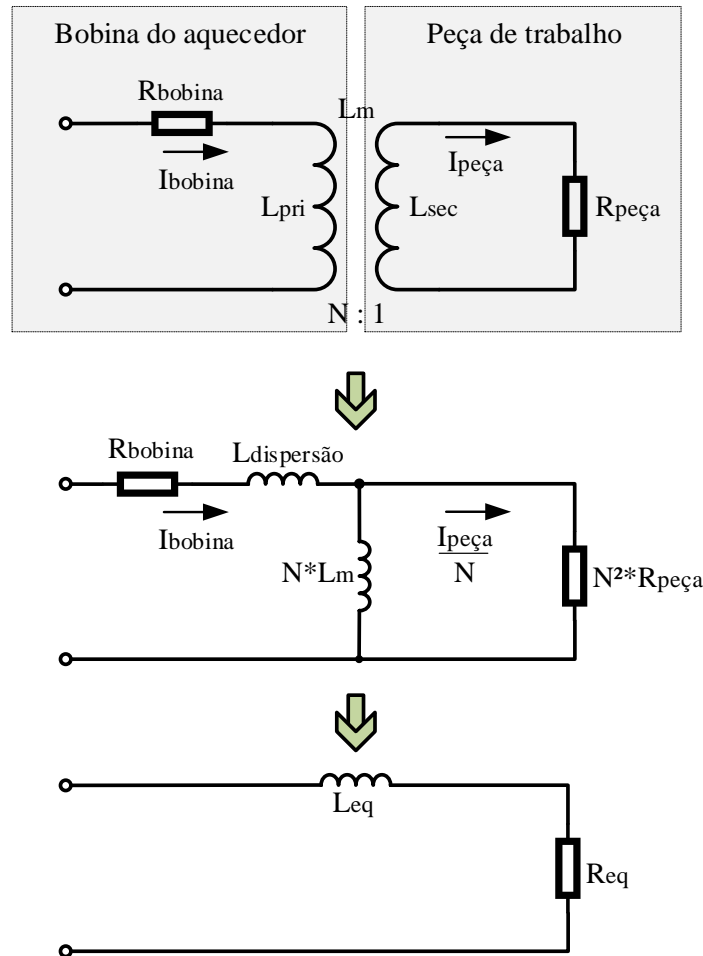


Figura 25 - Modelo equivalente elétrico do forno de indução.  
Fonte: Adaptado de [3].

Definindo a bobina com 24 espiras ( $N$ ), assim como em [3] e manipulando a expressão fornecida em [3] é possível calcular a corrente que deverá circular na bobina do forno de indução para promover a intensidade de fluxo magnético  $B_p$  na peça de trabalho a fim de realizar o tratamento térmico. Com base na simplificação do circuito equivalente apresentada na Figura 25 pode-se definir o cálculo para a corrente necessária na bobina do forno:

$$I_{bob} = \sqrt{\left(\frac{I_{peça}}{N}\right)^2 + (I_i)^2} = \sqrt{\frac{I_{peça}^2 + N^2 * I_i^2}{N^2}}$$

$$I_{bob} * N = \sqrt{I_{peça}^2 + N^2 * I_i^2} = \sqrt{I_{peça}^2 + (N * I_i)^2}$$

Como o campo magnético devido à indutância de magnetização é dado por  $H = \frac{N * I_i}{H_{in}}$  e  $H = \frac{B}{\mu}$ , tem-se que  $\frac{B_p}{\sqrt{2} * \mu} = \frac{N * I_i}{H_{in}}$  [3]. Assim, resolve-se:



$$I_{bob} * N = \sqrt{I_{pe\zeta a}^2 + \left(\frac{B_p * H_{in}}{\sqrt{2} * \mu}\right)^2}$$

$$I_{bob} = \frac{1}{N} \sqrt{(I_{pe\zeta a})^2 + \left(\frac{B_p * H_{in}}{\sqrt{2} * \mu_0 * \mu_r}\right)^2}$$

$$I_{bob} = 215,24 \text{ A}$$

Foram assumidas as mesmas dimensões do forno de indução projetado em [3], assim, para efeito de cálculo da resistência equivalente do circuito, a resistência do cobre da bobina será a mesma obtida em [3]:  $R_{cu} = 13 \text{ m}\Omega$ . A resistência elétrica equivalente é dada por:

$$R_{eq} = R_{cu} + N^2 * R_{pe\zeta a}$$

$$R_{eq} = 69,55 \text{ m}\Omega$$

A indutância equivalente é resultado da autoindutância da bobina primária reduzida da indutância mútua [3], [18]. A indutância mútua é obtida igualando-se as tensões nos ramos paralelos do circuito da Figura 25, onde:

$$\left(\frac{I_{pe\zeta a}}{N}\right) * N^2 * R_{pe\zeta a} = I_i * 2 * \pi * f * N * L_m$$

$$N * L_m = \frac{N^2 * R_{pe\zeta a} * I_{pe\zeta a}}{N * I_i * 2 * \pi * f}$$

Como  $N * I_i = \frac{B_p * H_{in}}{\sqrt{2} * \mu}$ , tem-se:

$$N * L_m = \frac{\sqrt{2} * \mu_0 * \mu_r * N^2 * R_{pe\zeta a} * I_{pe\zeta a}}{2 * \pi * f * B_p * H_{in}}$$

Assim pode-se calcular a indutância equivalente do circuito:

$$L_{eq} = L_{pri} - N * L_m$$

$$L_{eq} = \frac{\pi * \mu_0 * \mu_r * N^2 * A}{H_{in}} - \frac{\sqrt{2} * \mu_0 * \mu_r * N^2 * R_{pe\zeta a} * I_{pe\zeta a}}{2 * \pi * f * B_p * H_{in}}$$

$$L_{eq} = \frac{\pi * \mu_0 * \mu_r * N^2 * D_{in}^2}{4 * H_{in}} - \frac{\sqrt{2} * \mu_0 * \mu_r * N^2 * R_{peça} * I_{peça}}{2 * \pi * f * B_p * H_{in}}$$

$$L_{eq} = 42,63 \mu\text{H}$$

O cálculo do capacitor necessário para fazer com que a frequência de ressonância seja de 10 KHz é dado por:

$$C_{res} = \left( \frac{1}{2 * \pi * f_R} \right)^2 * \frac{1}{L}$$

$$C_{res} = 5,94 \mu\text{F}$$

Por fim têm-se os parâmetros elétricos definidos:

- $L_{eq} = 42,63 \mu\text{H}$
- $C_{res} = 5,94 \mu\text{F}$
- $R_{eq} = 69,55 \text{ m}\Omega$
- $I_{bob} = 215,24 \text{ A}$

- Projeto do conversor:

O circuito escolhido para a alimentação do aquecedor indutivo é o inversor monofásico em ponte com circuito ressonante em série, que nesse caso será alimentado por uma fonte de tensão contínua arbitrada em 60 V, para fazer com que a corrente desejada esteja próxima a 50% da corrente nominal da instalação.

A Figura 26 contém o circuito de controle e acionamento, que consiste na medição da corrente eficaz na bobina do aquecedor para realimentar a malha de controle, aplicando o sinal de erro em um controlador com ação proporcional e integral que irá fornecer a sinal de referência para um gerador de PWM, o qual gera os pulsos para as chaves do inversor. Os ganhos utilizados foram:  $K_p = 0,02$  e  $K_i = 0,7$ .

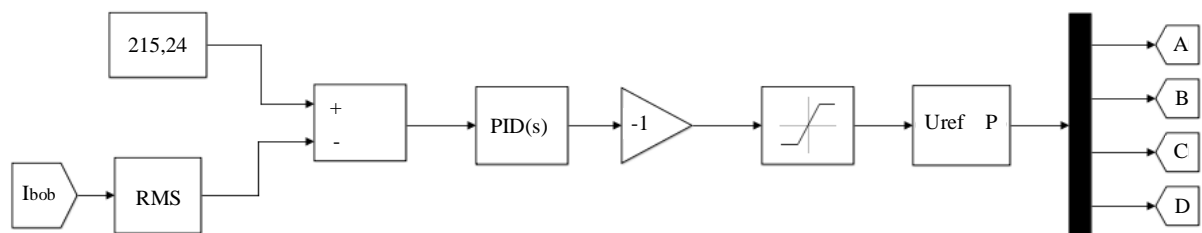


Figura 26 - Circuito de controle e acionamento.

O circuito foi projetado de modo a fornecer uma corrente eficaz de 215,24 A na carga. A Figura 27 apresenta o valor da corrente eficaz na carga ao longo do tempo, com uma mudança de valor de referência para exemplificar a atuação do controle em malha fechada.

Como não há outras interferências na simulação, a potência desejada foi atingida, porém em uma situação real, a característica da carga altera durante o aquecimento, assim como já foi discutido. Por este motivo, é necessário realizar um controle em malha fechada para atingir bons resultados na prática.

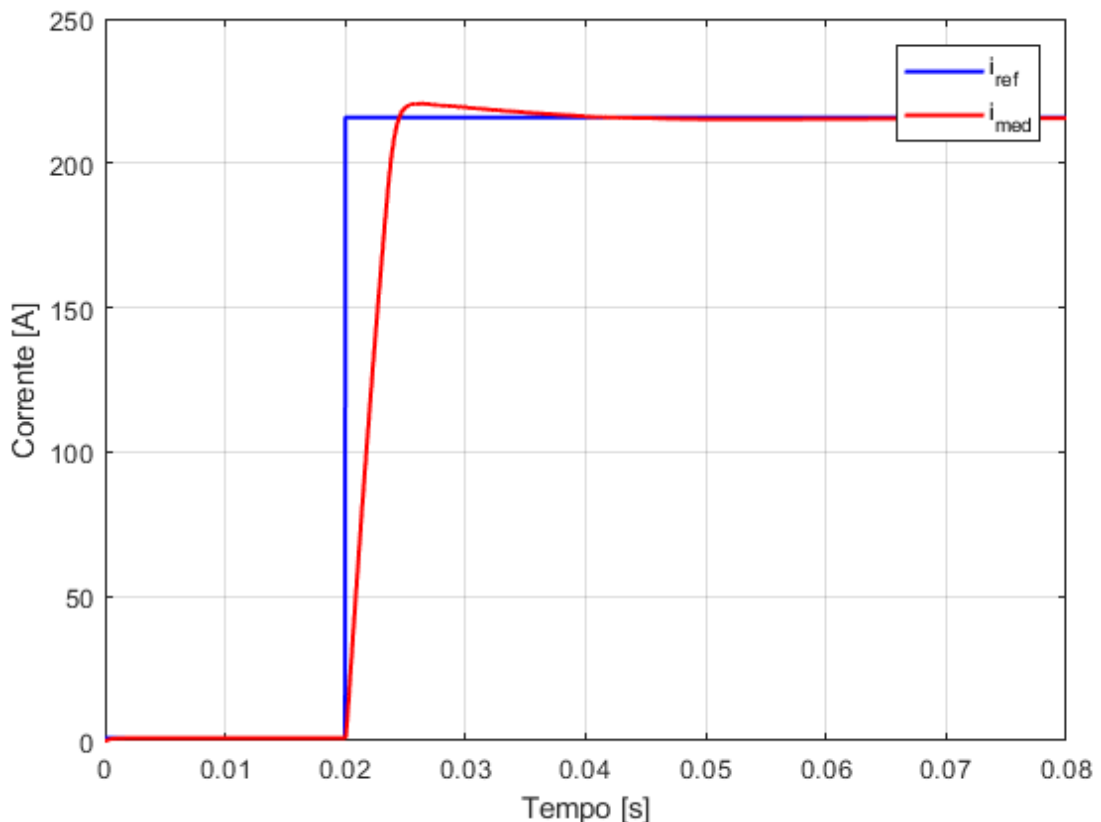


Figura 27 - Corrente eficaz na bobina do aquecedor.

A Figura 28 apresenta a sequência de comando das chaves semicondutoras e a forma de onda de tensão na saída do inversor. Está representado o sentido da corrente a cada momento de funcionamento do circuito.

Como pode ser visto na Figura 28, em um primeiro momento são acionadas as chaves Q1 e Q4 (1), fornecendo tensão positiva na saída do inversor, em seguida são acionadas as chaves Q1 e Q3 (2 e 3), fazendo com que a tensão na saída seja zerada, neste momento o circuito ressonante inverte o sentido da corrente elétrica, representada em azul (3). O semi-ciclo negativo da tensão quadrada é obtido de forma análoga, acionando-se primeiro as chaves Q3 e Q2 (4), e em seguida as chaves Q1 e Q3 (5 e 6), assim como representado na Figura 28.

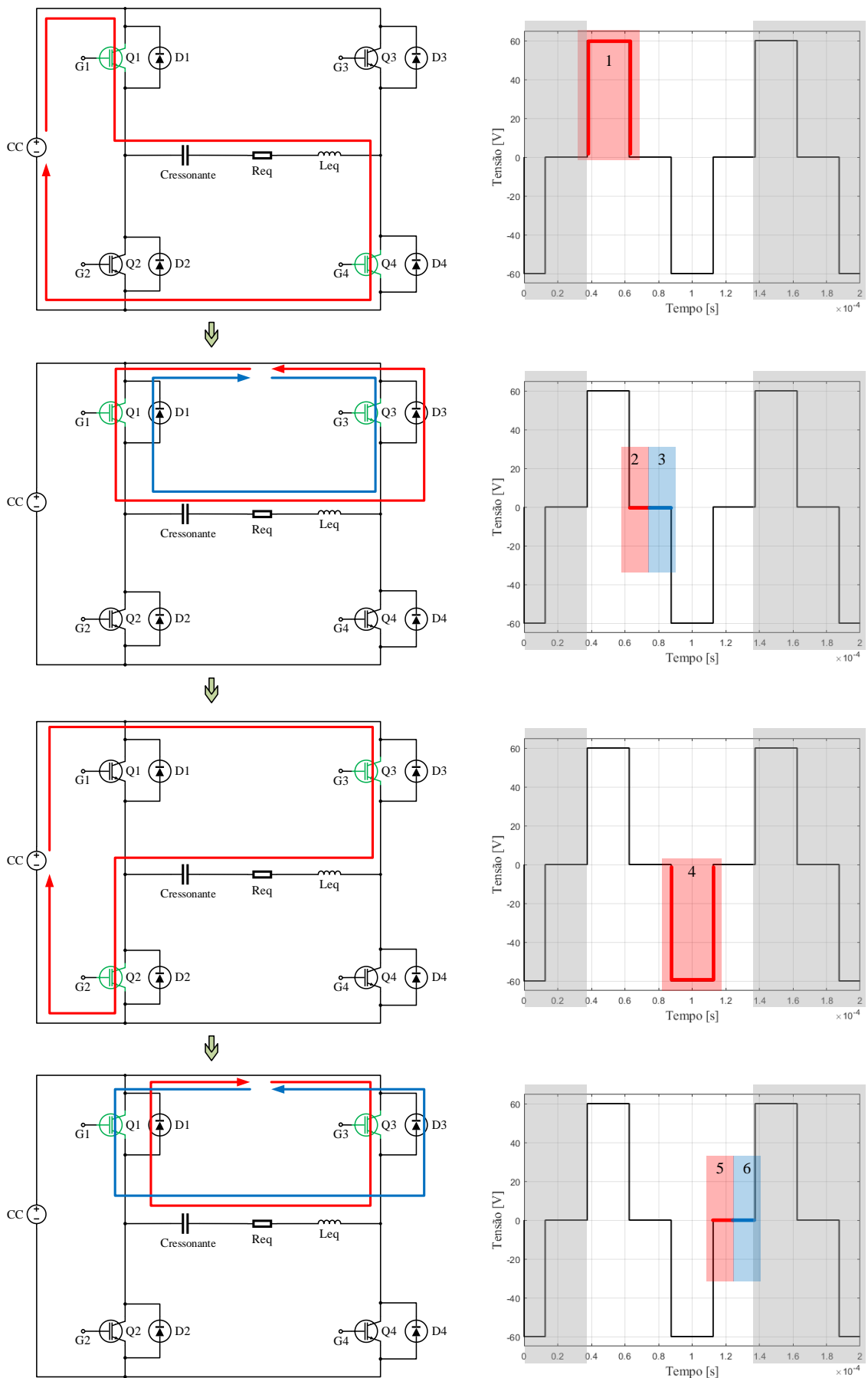


Figura 28 - Sequência de chaveamento do inversor.

Mantendo-se essa forma de chaveamento e alterando-se o tempo em que as chaves fornecem energia da fonte à carga, é possível controlar a tensão e a corrente eficazes na carga. Na Figura 29 foram alteradas as referências de corrente desejadas na bobina do aquecedor e amostrados as formas de onda de tensão na saída do inversor. É possível perceber que quanto maior é a referência de corrente, maior o tempo em que a tensão da fonte é disponibilizada na saída do inversor.

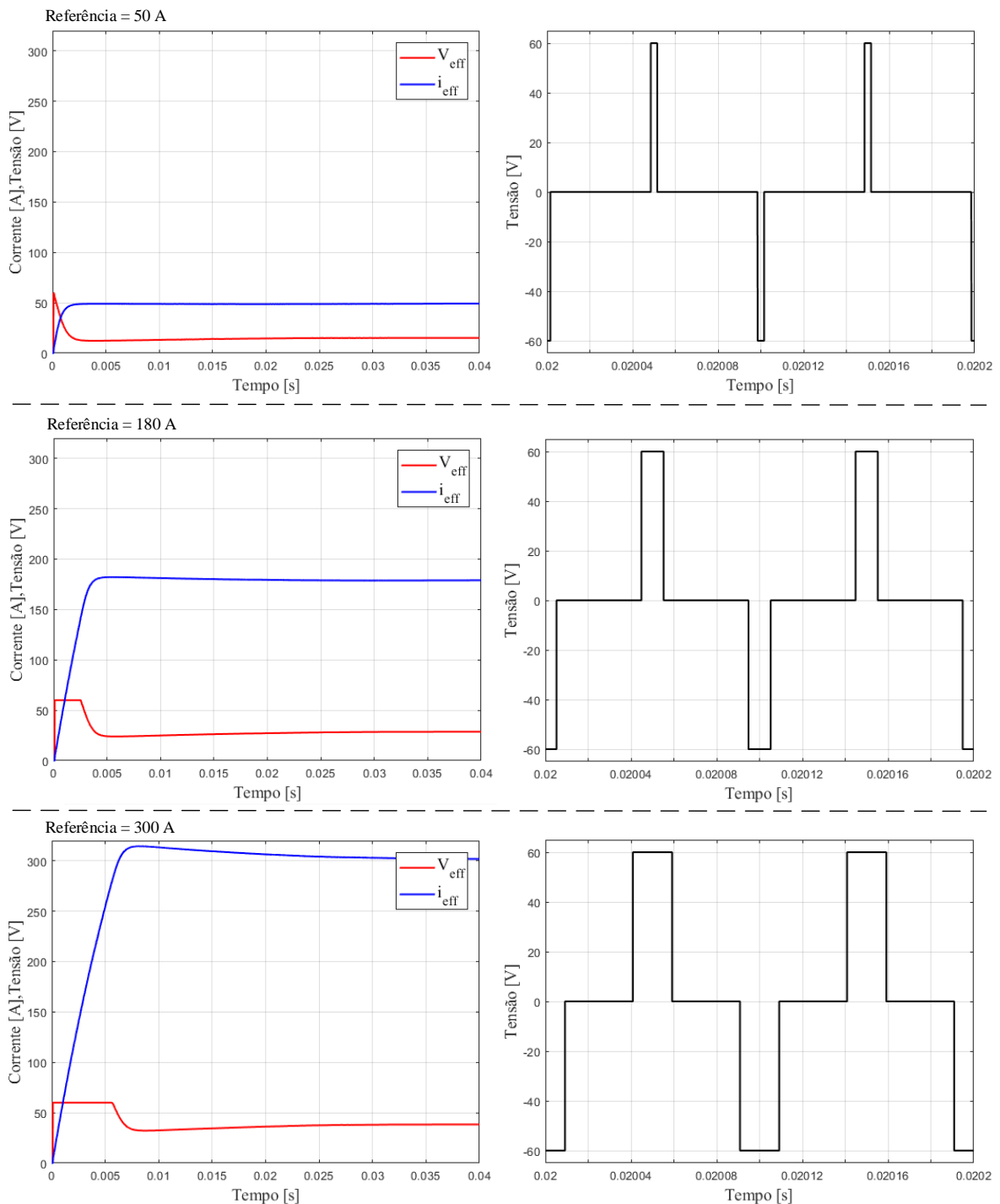


Figura 29 - Tensão na saída do inversor e corrente eficaz na bobina do aquecedor.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As aplicações de aquecimento por indução têm sido amplamente utilizadas com o auxílio de conversores eletrônicos, que permitem alimentar este tipo de equipamento de forma particular e controlada. A pesquisa mostrou a importância deste equipamento em máquinas de aquecimento e também as diversas variantes que interferem em seu funcionamento.

Neste trabalho foi realizada pesquisa ampla dos aspectos relacionados à utilização de conversores em aplicações de aquecimento por indução. Em seguida foi apresentado um projeto de aquecedor indutivo para uma aplicação de tratamento térmico, realizados os cálculos necessários para a sua elaboração e simulado o seu funcionamento computacionalmente.

Uma instalação de aquecimento por indução deve ser projetada considerando-se desde o objeto a ser aquecido, em termos de formato, material e massa, até a necessidade do processo em termos de potência, alimentação elétrica e necessidade de controle.

Por fim, a pesquisa abrangente aponta que várias áreas do conhecimento necessitam ser estudadas para se conseguir os melhores resultados em termos de funcionamento e eficiência desse tipo de equipamento. Pode-se aprofundar a pesquisa no dimensionamento dos componentes, como bobinas, capacitores e chaves semicondutoras, no modo de acionamento destas chaves e nos métodos para controle em malha fechada dos sistemas de aquecimento por indução.

Propõe-se para a continuidade o estudo detalhado de uma das configurações de máquinas de aquecimento por indução aqui citadas e a construção de um protótipo para demonstrar fisicamente os principais aspectos dessa tecnologia.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Singh and A. Chouhan, “Design of channel induction furnace using IGBT technology”, *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)*, Indore, 2015, pp. 1-5.
- [2] Aquecimento por Indução Bobinas de indução. Disponível em <https://www.ambrell.com>. Acesso em 15 de Novembro de 2019.
- [3] M. B. Iqbal, N. Masud and M. Aqil, “Design of induction coil of a coreless induction furnace to melt aluminum”, *17th IEEE International Multi Topic Conference 2014*, Karachi, 2014, pp. 523-528.
- [4] V. R. Gandhewar, S. V. Bansod and A. B. Borade, “Induction Furnace- A Review”, *International Journal Of Engineering and Technology*, vol. 3, August 2011.
- [5] R. Robert, ”Efeito Pelicular”, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol.22, no. 2, Junho, 2000.
- [6] V. Rudnev, D. Loveless and R. Cook, *Handbook of induction heating*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
- [7] S. Chudjuarjeen, Anawach Sangswang and C. Koumpai, “An improved LLC resonant inverter for induction heating with asymmetrical control”, *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Seoul, 2009, pp. 1612-1617.
- [8] R. A. Fernandes, I. T. C. Alves, V. V. Valenzuela and D. Se, “Implementation of portable and power controllable inductive furnace by DC-DC power converters”, *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, Niteroi, 2018, pp. 1-6.
- [9] A. Kiyoumars, R. Houshmand, R. Ali-Zargar and M. Hassanzadeh, “Closed loop power control of an induction furnace”, *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, Vilamoura, 2008, pp. 1-6.
- [10] E. Rapoport and Y. Pleshivtseva, *Optimal control of induction heating processes*. Boca Raton, Fla.: CRC/Taylor & Francis, 2007.
- [11] S. D. Umans, *Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley*. 7. Ed. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2014.
- [12] R. Phadungthin and J. Haema, “Application study on induction heating using half bridge LLC resonant inverter”, *2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Siem Reap, 2017, pp. 1582-1585.
- [13] J. C. C. Galeano, G. H. Alvarez and E. J. B. Nocua, “Design Validation and Construction of an Induction Furnace Coil”, in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 713-720, Feb. 2016.
- [14] R. P. Machado, *Medidas do efeito pelicular clássico em condutores de cobre – proposta de um novo modelo*, M. S. Thesis, ECM, UFP, Paraná, Brasil, 2007.
- [15] J. Mamede Filho, *Instalações elétricas industriais (9a. ed.)*. Rio de Janeiro: Grupo Gen - LTC, 2017.

- [16] G. Martín Segura and D. Montesinos Miracle, *Induction heating converter's design, control and modeling applied to continuous wire heating*. [Barcelona]: Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2012.
- [17] W. Komatsu and W. Po, "A method for control and protection of series resonant induction furnaces", *IAS '97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, New Orleans, LA, USA, 1997, pp. 1661-1666 vol.2.
- [18] R. Ristiana, A. Syaichu-Rohman and P. H. Rusmin, "Modeling and control of temperature dynamics in induction furnace system", *2015 5th IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, Shah Alam, 2015, pp. 6-11.
- [19] M. Sadiku, *Elementos de eletromagnetismo*, 3rd ed. Porto Alegre: Bookman, 2004, pp. 306-316.
- [20] C. Haroswati Che Ku Yahaya, S. Syed Adnan, M. Kassim, R. Ab Rahman and M. Bin Rusdi, "Analysis of Wireless Power Transfer on the inductive coupling resonant", *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 12, no. 2, p. 592, 2018.
- [21] N. Booma and S. Ramareddy, "Pulse Mask Controlled HFAC Resonant Converter for high efficiency Industrial Induction Heating with less harmonic distortion", *Acta Sci. Technol.*, vol. 38, n° 2, p. 173-183, abr. 2016.
- [22] Ó. Jiménez, O. Lucia, I. Urriza, L. A. Barragan, P. Mattavelli and D. Boroyevich, "An FPGA-Based Gain-Scheduled Controller for Resonant Converters Applied to Induction Cooktops", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 4, pp. 2143-2152, April 2014.
- [23] B. Nagarajan, R. Sathi and P. Vishnuram. "Fuzzy logic based voltage control scheme for improvement in dynamic response of the class D inverter based high frequency induction heating system". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016.
- [24] B. Meziane and H. Zeroug, "Comprehensive Power Control Performance Investigations of Resonant Inverter for Induction Metal Surface Hardening", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6086-6096, Oct. 2016.
- [25] D. Hart, *Electrónica de potencia*. Madrid: Pearson educación, 2008.
- [26] S. Nagai, H. Nagura, M. Nakaoka and A. Okuno, "High-frequency inverter with phase-shifted PWM and load-adaptive PFM control strategy for industrial induction-heating", *Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting*, Toronto, Ontario, Canada, 1993, pp. 2165-2172 vol.3.
- [27] V. Esteve *et al.*, "Enhanced Pulse-Density-Modulated Power Control for High-Frequency Induction Heating Inverters", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 11, pp. 6905-6914, Nov. 2015.
- [28] N. Pal, P. Sadhu and A. Bandyopadhyay, "Selection of Switching Frequency for H. F. Mirror Inverter Employed in Industrial Induction Heating", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, pp. 14-18, 2012.



- [29] J. M. Espi-Huerta, E. J. Dede Garcia Santamaria, R. Garcia Gil and J. Castello-Moreno, "Design of the L-LC Resonant Inverter for Induction Heating Based on Its Equivalent SRI", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 6, pp. 3178-3187, Dec. 2007.
- [30] O. Lucía, P. Maussion, E. J. Dede and J. M. Burdío, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2509-2520, May 2014.
- [31] M. Rashid, *Eletrônica de potência*. São Paulo: Makron, 1999.
- [32] K. B. Zhao, P. C. Sen and G. Premchandran, "A Thyristor Inverter for Medium-Frequency Induction Heating", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. IE-31, no. 1, pp. 34-36, Feb. 1984.
- [33] N. S. Bayindir, O. Kukrer and M. Yakup, "DSP-based PLL-controlled 50-100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications", in *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 150, no. 3, pp. 365-371, May 2003.
- [34] W. McMurray, "Optimum Snubbers for Power Semiconductors", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-8, no. 5, pp. 593-600, Sept. 1972.
- [35] F. Tâmega. *Fundição de processos siderúrgicos*. Londrina : Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017.
- [36] R.L. Baldan e E.A. Vieira. *Fundição: processos e tecnologias correlatas*. São Paulo: Editora Érica, 2013.
- [37] A. Dominguez, L. A. Barragan, A. Otin, D. Navarro and D. Puyal, "Inverse-Based Power Control in Domestic Induction-Heating Applications", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 5, pp. 2612-2621, May 2014.
- [38] V. Meshcheryakov and S. Titov, "Induction heating plant for heat treatment of spherical metal products", *Russian Metallurgy (Metally)*, vol. 2015, no. 12, pp. 985-992, 2015.
- [39] Aplicações de aquecimento por indução. Disponível em <https://www.3mi.ind.br>. Acesso em 10 de Novembro de 2019.
- [40] J. A. Pomilio. "Eletrônica de Potência". Universidade Estadual de Campinas, DSE, Campinas, Brasil, 2013. Disponível em <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor>. Acesso em 5 de Novembro de 2019.
- [41] A. C. Duarte, R. S. Machado e D. S. Costa. "Sistema conversor retificador de 12 pulsos utilizando transformador de 3 enrolamentos". Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2015. Disponível em <https://saturno.unifei.edu.br>. Acesso em 2 de Novembro de 2019.
- [42] Manual do Equipamento Vip Power Trak, Dual Trak e Power Melt, Inductotherm Group Brasil.
- [43] J. Zerad, S. Riachy, P. Toussaint and J. Barbot, "Novel Phasor Transformation for Feedback Control Design of Induction Heating Systems With Experimental Results", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6478-6485, Oct. 2015.

- [44] A. Ahmed, *Eletrônica de potência*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2008.
- [45] J. A. Pomilio. “Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica”. Universidade Estadual de Campinas, DSE, Campinas, Brasil, 2017. Disponível em <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor>. Acesso em 7 de Novembro de 2019.
- [46] J. A. Pomilio. “Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS”. Universidade Estadual de Campinas, DSE, Campinas, Brasil, 2009. Disponível em <http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor>. Acesso em 7 de Novembro de 2019.
- [47] H. Zeroug and B. Meziane, “Open-loop control of full-bridge resonant inverter for induction metal surface heating”, *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, TX, 2014, pp. 3258-3264.
- [48] Y. Yue, Q. Xu, P. Guo and A. Luo, “Constant temperature control of tundish induction heating power supply for metallurgical manufacturing”, *Frontiers in Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 16-26, 2018.
- [49] H. Fujita, N. Uchida and K. Ozaki, “A New Zone-Control Induction Heating System Using Multiple Inverter Units Applicable Under Mutual Magnetic Coupling Conditions”, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 7, pp. 2009-2017, July 2011.
- [50] J. Egalon, S. Caux, P. Maussion, M. Souley and O. Pateau, “Multiphase System for Metal Disc Induction Heating: Modeling and RMS Current Control”, in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, pp. 1692-1699, Sept.-Oct. 2012.